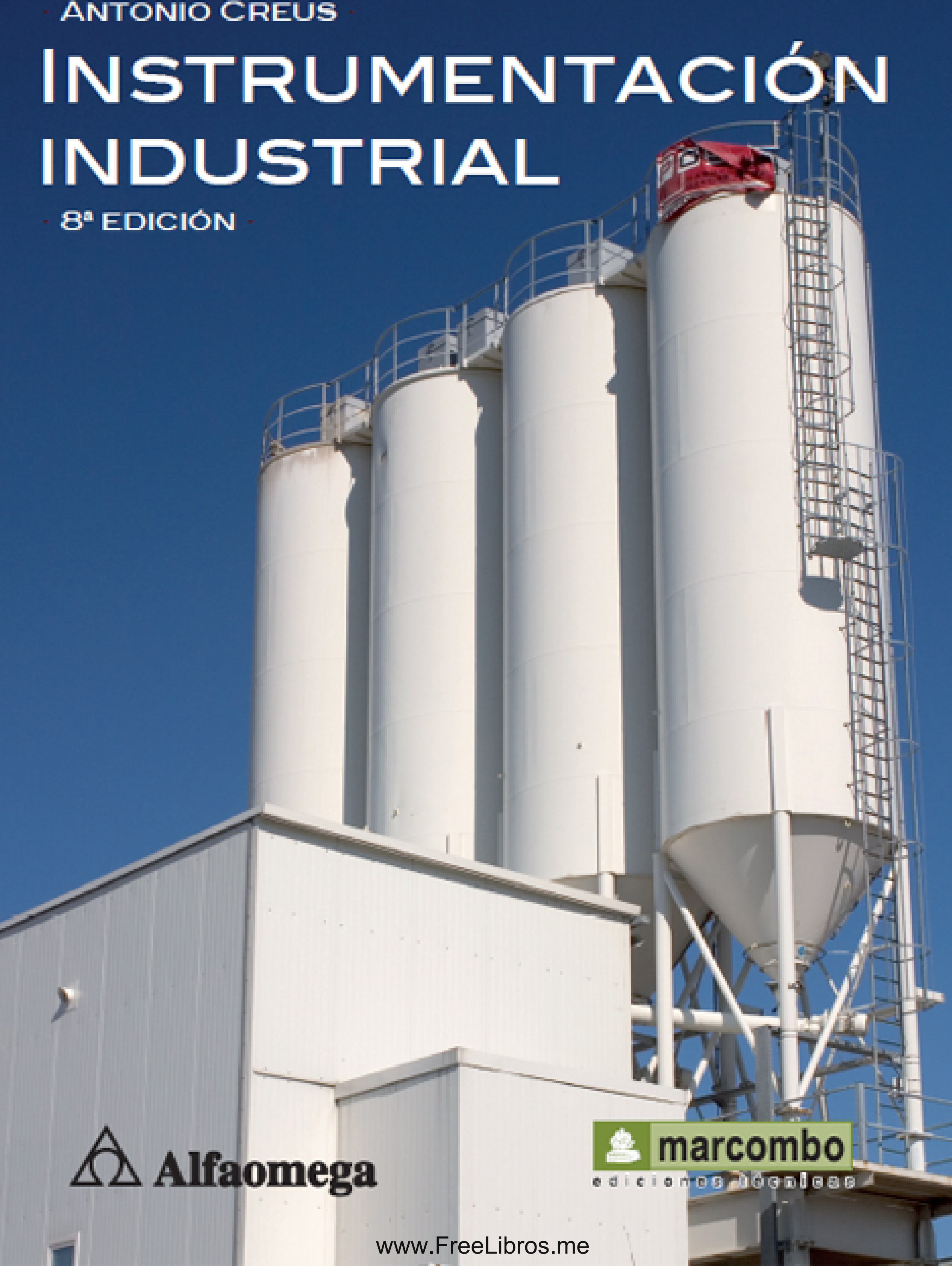


ANTONIO CREUS
INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL
8ª EDICIÓN
Alfaomega
marcombo
ediciones técnicas



8ª EDICIÓN

INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL



8ª EDICIÓN

INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Antonio Creus Solé





Datos catalográficos

Creus, Antonio
Instrumentación industrial
Octava Edición

Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México
ISBN: 978-607-707-042-9
Formato: 17 x 23 cm Páginas: 792

Instrumentación industrial
Antonio Creus Solé
ISBN: 978-84-267-1668-2, edición en español publicada por MARCOMBO, S.A., Barcelona, España

Octava edición: Alfaomega Grupo Editor, México, septiembre 2010

Pitágoras 1139, Col. Del Valle, 03100, México D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana
Registro No. 2317

Pág. Web: **http://www.alfaomega.com.mx**
E-mail: **atencionalcliente@alfaomega.com.mx**

ISBN: 978-607-707-042-9

Impreso en México. Printed in Mexico.

Empresas del grupo:

México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. – Pitágoras 1139, Col. Del Valle, México, D.F. – C.P. 03100.
Tel.: (52-55) 5089-7740 – Fax: (52-55) 5575-2420 / 2490. Sin costo: 01-800-020-4396
E-mail: atencionalcliente@alfaomega.com.mx

Colombia: Alfaomega Colombiana S.A. – Carrera 15 No. 64 A 29 – PBX (57-1) 2100122, Bogotá, Colombia, Fax: (57-1) 6068648 – E-mail: scliente@alfaomega.com.co

Chile: Alfaomega Grupo Editor, S.A. – General del Canto 370-Providencia, Santiago, Chile
Tel.: (56-2) 235-4248 – Fax: (56-2) 235-5786 – E-mail: agechile@alfaomega.cl

Argentina: Alfaomega Grupo Editor Argentino, S.A. – Paraguay 1307 P.B. "11", Buenos Aires, Argentina, C.P. 1057 – Tel.: (54-11) 4811-7183 / 8352, E-mail: ventas@alfaomegaeditor.com.ar

Índice analítico



Prólogo a la octava edición

La primera edición de este libro apareció en el año 1979, la segunda en 1981, la tercera en 1985, la cuarta en 1989, la quinta en 1993, la sexta en 1997 y la séptima en 2005. Durante estos años, las novedades incorporadas en la industria fueron el perfeccionamiento del control distribuido, aparecido inicialmente en 1975, la aparición del transmisor inteligente digital en 1986, la aplicación masiva del microprocesador, en todos los campos de la industria, con las espectaculares mejoras en los instrumentos de medición y control que de una precisión en la variable medida clásica del ± 0,5% han pasado al ±0,1%, el perfeccionamiento del control avanzado, del control por redes neuronales, del control por lógica difusa y el avance de las comunicaciones hacia protocolos abiertos.

En la séptima edición se revisaron las definiciones de control y el resumen de las normas ISA e ISO de identificación de instrumentos en el capítulo 1, las comunicaciones en el capítulo 2 y, en el capítulo 9, se agruparon el control por computador con el control avanzado incluyendo su análisis dinámico y se añadió el control integrado con todos sus componentes de gestión de alarmas y de seguridad de la planta. Se incluyó un resumen de la norma de calidad ISO 9000 del año 2000 y se actualizó el capítulo 10 de calibración de los instrumentos, trasladando al apéndice la evolución de la instrumentación y añadiendo hojas representativas de especificaciones de instrumentos.

En esta edición actual se han revisado todos los capítulos, en particular el primero en la parte de incertidumbre y exactitud de la medida, el segundo en la parte de comunicaciones, el sexto en pirómetros y en las tablas de termopares y el capítulo 8 en el dimensionamiento de las válvulas de control. Se ha conservado el texto de las ediciones anteriores, ampliándolo con los nuevos instrumentos y técnicas aparecidas en el mercado y se ha reducido el estudio de la instrumentación neumática y electrónica, en favor de la digital. Se han conservado las explicaciones básicas de los instrumentos electrónicos y el punto de vista de considerar el instrumento dotado de microprocesador con sus algoritmos de control como una "caja negra" que se comporta igual que un instrumento convencional neumático o electrónico pero, lógicamente, proporcionando unas mejores prestaciones.

En lo posible se han incluido fotos de instrumentos reales junto con los esquemas para que el lector pueda identificarlos en planta.

Antonio CREUS


www.FreeLibros.me

Prólogo

Los instrumentos de control están universalmente aceptados. Hoy en día, es inimaginable la existencia de una industria moderna sin instrumentos. Y, aunque existiera, las necesidades, que crea el mercado, de obtener productos terminados con las garantías de calidad exigidas y en la cantidad suficiente para que el precio obtenido sea competitivo, forzarían a modificar esta hipotética industria, incluyendo en la transformación subsiguiente la automatización del proceso mediante los instrumentos de medición y control.

En la industria se presenta pues, repetidamente, la necesidad de conocer y entender el funcionamiento de los instrumentos y el papel que juegan dentro del control del proceso. Así le ocurre al jefe o al operador del proceso, al proyectista y a su ingeniería, al estudiante y a cualquier persona que esté relacionada o vaya a relacionarse con el proceso, sin mencionar, como es lógico, al instrumentista o al técnico en instrumentos para quienes el tema es la esencia de su profesión.

A todas estas personas va dirigido este libro que ha sido escrito exponiendo los aspectos más interesantes para el técnico que, aunque no sea especialista en instrumentos, tenga la necesidad de conocer parte o todo el campo de la instrumentación industrial. Desde este punto de vista he intentado que los temas expuestos sean fácilmente inteligibles para el lector, aunque no tenga una preparación previa en instrumentación, con la excepción, naturalmente, de las partes de la obra dedicadas al análisis dinámico de los instrumentos, en las que se precisa una base matemática, que no obstante se facilita en forma resumida en el Apéndice A para referencia del lector.

La obra consta de once capítulos y de dos apéndices. En el primer capítulo se examinan los términos que definen a los instrumentos y un código para su identificación.

En el segundo capítulo se estudian los transmisores y los sistemas de comunicaciones.

En los capítulos 3, 4, 5, 6 y 7 se estudian las variables medidas y controladas en los procesos industriales, en particular las que son consideradas más importantes, la presión, el caudal, el nivel y la temperatura.

En el capítulo 8 se estudian los elementos finales de control que constituyen una de las partes más importantes del control, en particular, las válvulas. Se describen sus elementos y se deducen las fórmulas de cálculo correspondientes.

La parte más importante de la obra está dedicada al control automático en el capítulo 9. Describe los sistemas de control utilizados explicando los conceptos del control proporcional, integral y derivativo con sus valores consignados en el instrumento. Este capítulo examina, además, otros tipos de control que constituyen mejoras de los clásicos PID y, entre

los que se encuentran, el control avanzado, la seguridad intrínseca y funcional, el control distribuido, el control integrado, etc.

En el capítulo 10 se describen los errores propios de los instrumentos, un sistema general de calibración y una descripción de los instrumentos de comprobación o patrones utilizados.

Finalmente, en el capítulo 11 figuran varias aplicaciones típicas en la industria para presentar al lector ejemplos que le permitan hacerse una idea de las múltiples aplicaciones de los instrumentos y su papel dentro del proceso. Este capítulo se limita, naturalmente, a estudiar sólo unos pocos procesos y todavía de forma simple, ya que un estudio exhaustivo requeriría una obra dedicada exclusivamente a esta parte de las aplicaciones, lo que queda, como es lógico, fuera de los límites de este libro.

Un apéndice dedicado al análisis dinámico de los instrumentos, a la evolución de la instrumentación y a la presentación de hojas de especificaciones de instrumentos completan la obra. Permite al lector familiarizarse con los términos empleados en el análisis armónico, estudia el control desde el punto de vista dinámico, lo que permite deducir un camino en el cual están basados los criterios establecidos para el ajuste adecuado de los controladores y las técnicas del control avanzado. Se incluye una descripción de la evolución que ha ido experimentando la instrumentación en los últimos años de acuerdo con la industria, con la que ha ido avanzando paralelamente. Finalmente, y como material adicional, se incluyen ejemplos típicos de hojas de especificación de instrumentos.

Espero que la obra cumplirá su objetivo, contribuyendo a la mejor comprensión de la instrumentación, y que ayudará, conjuntamente con la bibliografía existente sobre el tema, a un mayor entendimiento entre el personal de proceso y el de instrumentación, al posibilitar el mejor conocimiento del papel que los instrumentos juegan en la industria, así como de sus limitaciones, que forzosamente las tienen al ser, en realidad, dispositivos mecánicos, electrónicos o digitales.

Capítulo 1
Generalidades

1.1 Introducción

Los procesos industriales exigen el control de la fabricación de los diversos productos obtenidos. Los procesos son muy variados y abarcan muchos tipos de productos: la fabricación de los productos derivados del petróleo, de los productos alimenticios, la industria cerámica, las centrales generadores de energía, la siderurgia, los tratamientos térmicos, la industria papelera, la industria textil, etc.

En todos estos procesos, es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes, tales como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura, el pH, la conductividad, la velocidad, la humedad, el punto de rocío, etc. Los instrumentos de medición y control permiten el mantenimiento y la regulación de estas constantes en condiciones más idóneas que las que el propio operador podría realizar.

En los inicios de la era industrial, la operatoria de los procesos se llevaba a cabo con un control manual de estas variables utilizando sólo instrumentos simples, manómetros, termómetros, válvulas manuales, etc., control que era suficiente por la relativa simplicidad de los procesos. Sin embargo, la gradual complejidad con qué éstos se han ido desarrollando ha exigido su automatización progresiva por medio de los instrumentos de medición y control. Estos instrumentos han ido liberando al personal de campo de su función de actuación física directa en la planta y, al mismo tiempo, le han permitido una labor única de supervisión y de vigilancia del proceso desde centros de control situados en el propio proceso o bien en salas aisladas separadas; asimismo, gracias a los instrumentos, ha sido posible fabricar productos complejos en condiciones estables de calidad y de características, condiciones que al operario le serían imposibles o muy difíciles de conseguir, realizando exclusivamente un control manual.

Los procesos industriales a controlar pueden dividirse ampliamente en dos categorías: procesos continuos y procesos discontinuos. En general, en ambos tipos deben mantenerse las variables (presión, caudal, nivel, temperatura, etc.), bien en un valor deseado fijo, bien en un valor variable con el tiempo de acuerdo con una relación predeterminada, o bien guardando una relación determinada con otra variable.

El sistema de control que permite este mantenimiento de las variables puede definirse como aquel que compara el valor de la variable, o condición a controlar, con un valor deseado y toma una acción de corrección de acuerdo con la desviación existente sin que el operario intervenga en absoluto.

El sistema de control exige pues, para que esta comparación y subsiguiente corrección sean posibles, que se incluya una unidad de medida, una unidad de control, un elemento final de control y el propio proceso. Este conjunto de unidades forman un bucle o lazo que recibe el nombre de lazo de control. El lazo puede ser abierto o bien cerrado (figura 1.1).

En el lazo de control abierto de la figura 1.1 el operador ajusta la válvula manual en la forma que cree conveniente para igualar el caudal del líquido de salida con el de entrada. Si los caudales de

entrada y salida son muy diferentes con picos de consumo desiguales, al operador le será difícil mantener un nivel constante de modo que tendrá que hacer ajustes con frecuencia. En cambio, en el control de lazo cerrado, una vez ajustada la posición del vástago de la válvula de control con la varilla del índice del flotador, el propio sistema se encargará de mantener el nivel en el punto deseado. Si en algún momento se presentan picos de caudal en la entrada, el nivel aumentará, con lo cual, la válvula de control abrirá para aumentar el caudal de salida y mantener así un nivel controlado, independientemente de la actuación del operador.

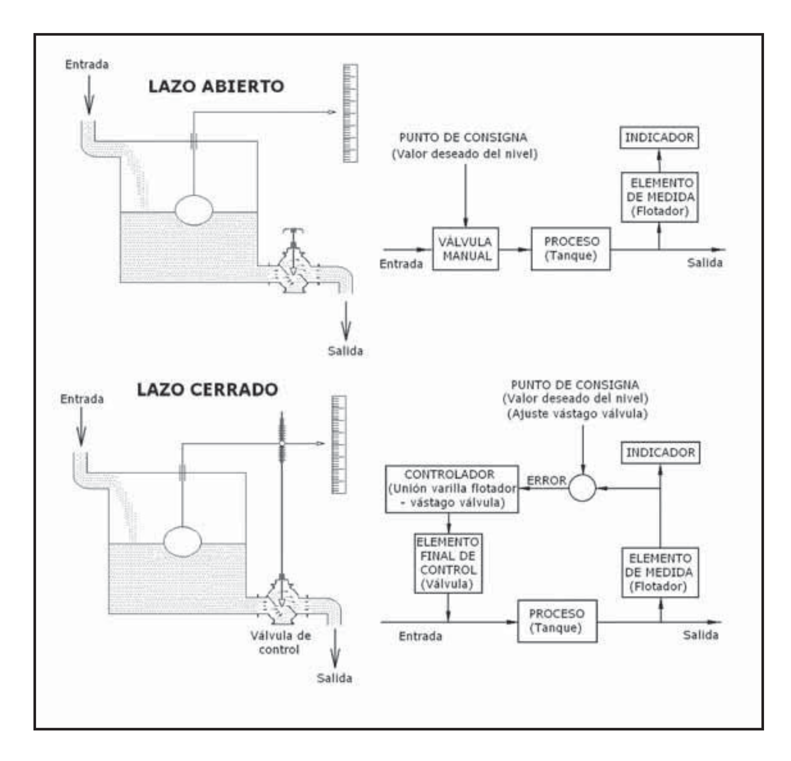


Figura 1.1 Control de nivel en lazo abierto y lazo cerrado

Otro ejemplo de lazo abierto es el calentamiento de agua en un tanque mediante una resistencia eléctrica sumergida. Los procesos con constantes de tiempo importantes o con retardos considerables son adecuados para el control en lazo abierto. La principal desventaja del lazo abierto es la pérdida de exactitud. No hay garantía de que la entrada manual al proceso sea la adecuada para llevar la variable al punto de consigna deseado. Otro ejemplo de lazo cerrado representativo lo constituye la regulación de temperatura en un intercambiador de calor (figura 1.2).

En ocasiones, el control de lazo cerrado debe operar en lazo abierto, tal como puede ocurrir en el arranque de procesos por parte de un operador experimentado con un buen conocimiento del proceso. El operador, en base a su experiencia, abrirá o cerrará el elemento final de control (válvula de control, etc.) más allá de lo que lo haría un lazo cerrado de control, con lo que conseguirá una mayor velocidad en la variable y alcanzar el punto de consigna en menos tiempo.

En ambos casos se observa que existen elementos definidos como el elemento de medida, el transmisor, el controlador, el indicador, el registrador y el elemento final.

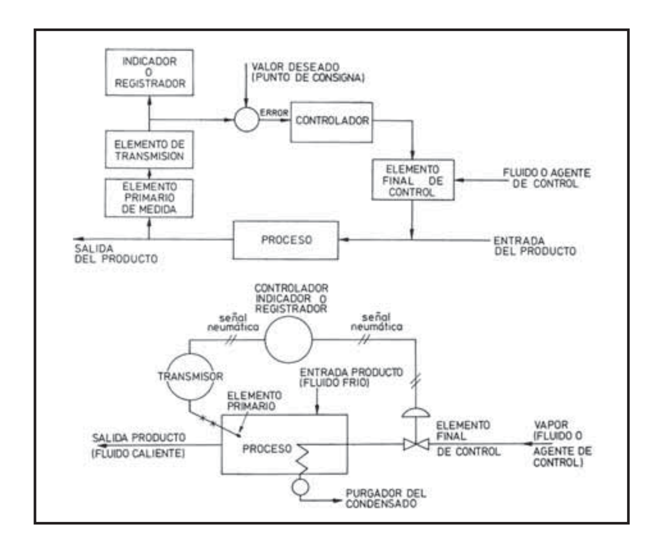


Figura 1.2 Lazo cerrado de control de un intercambiador de calor

Si se desea que el proceso tenga velocidad y exactitud en alcanzar el valor de la variable deseada (punto de consigna) deben aplicarse simultáneamente el control de lazo abierto y el cerrado, lo que constituye el llamado control anticipativo (*feedforward*). Este tipo de control utiliza un modelo matemático que actúa inicialmente como un operador experto (lazo abierto) y que de acuerdo con los resultados obtenidos en la variable, realiza correcciones adicionales que corresponden al control de lazo cerrado.

Por ejemplo, un coche equipado con un control de velocidad y con un sistema de radar que capte los cambios de pendiente en la carretera, aumentará su velocidad para impedir que el coche reduzca su velocidad al pasar del llano a una subida. Sin el radar, el controlador de velocidad del coche no puede saber que el coche necesita ser acelerado hasta que la velocidad ha disminuido al empezar la subida.

1.2 Definiciones en control

Los instrumentos de control empleados en las industrias de proceso tales como química, petroquímica, alimenticia, metalúrgica, energética, textil, papel, etc., tienen su propia terminología; los términos empleados definen las características propias de medida y de control y las estáticas y dinámicas de los diversos instrumentos utilizados:

- Indicadores, registradores, controladores, transmisores y válvulas de control.

La terminología empleada se ha unificado con el fin de que los fabricantes, los usuarios y los organismos o entidades que intervienen directa o indirectamente en el campo de la instrumentación industrial empleen el mismo lenguaje. Las definiciones de los términos empleados se relacionan con las sugerencias hechas por ANSI/ISA-S51.1-1979 (R 1993) aprobadas el 26 de mayo de 1995. Se representan en la figura 1.3 y son las siguientes (figuran entre paréntesis los términos ingleses equivalentes).

1.2.1 Campo de medida

El *campo de medida (range)* es el espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida, de recepción o de transmisión del instrumento. Viene expresado estableciendo los dos valores extremos.

Ejemplo: un manómetro de intervalo de medida 0- 10 bar, un transmisor de presión electrónico de 0-25 bar con señal de salida 4-20 mA c.c. o un instrumento de temperatura de 100-300 °C.

Otro término derivado es el de *dinámica de medida* o *rangeabilidad* (*rangeability*), que es el cociente entre el valor de medida superior e inferior de un instrumento. Por ejemplo, una válvula de control lineal que regule linealmente el caudal desde el 2% hasta el 100% de su carrera tendrá una rangeabilidad de 100/2 = 50.

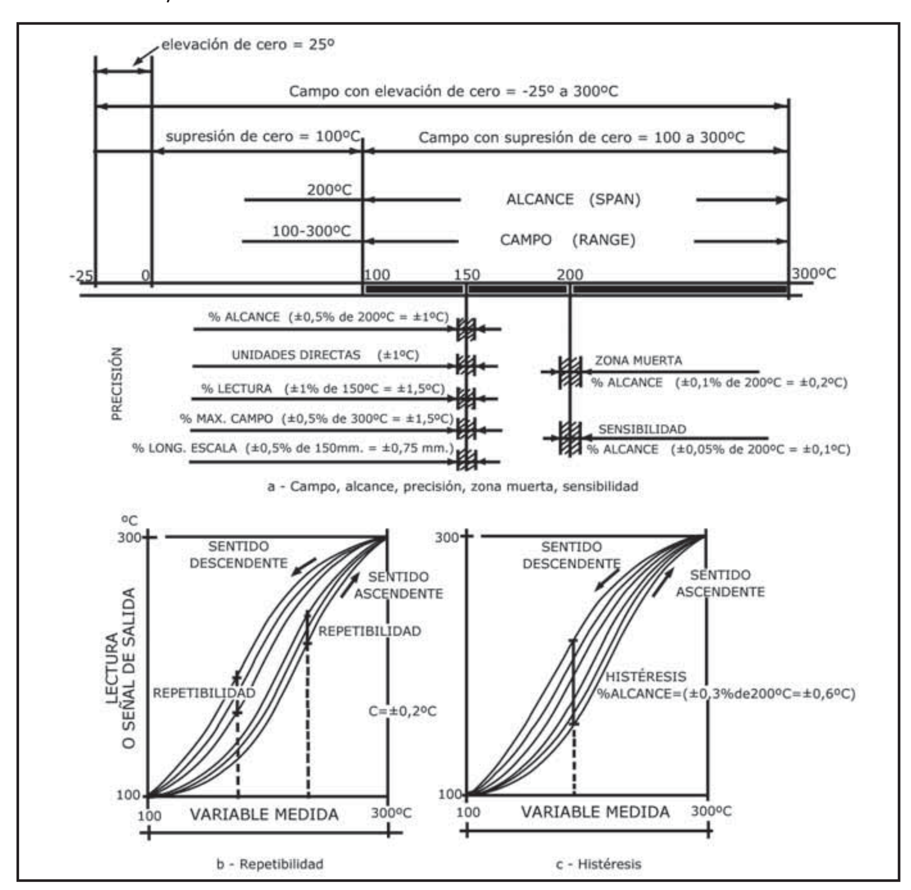


Figura 1.3 Definiciones de los instrumentos

1.2.2 Alcance

El *alcance (span)* es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento. En los ejemplos anteriores es de 10 bar para el manómetro, de 25 bar para el transmisor de presión y de 200 °C para el instrumento de temperatura.

1.2.3 Error

El *error* de la medida es la desviación que presentan las medidas prácticas de una variable de proceso con relación a las medidas teóricas o ideales, como resultado de las imperfecciones de los aparatos y de las variables parásitas que afectan al proceso. Es decir:

$$Error = Valor\ leído\ en\ el\ instrumento - Valor\ ideal\ de\ la\ variable\ medida$$

El error absoluto es:

$$Error\ absoluto = Valor\ leído - Valor\ verdadero$$

El error relativo representa la calidad de la medida y es:

$$Error\ relativo = Error\ absoluto / Error\ verdadero$$

Si el proceso está en condiciones de régimen permanente existe el llamado *error estático*. En condiciones dinámicas el error varía considerablemente debido a que los instrumentos tienen características comunes a los sistemas físicos: absorben energía del proceso y esta transferencia requiere cierto tiempo para ser transmitida, lo cual da lugar a retardos en la lectura del aparato. Siempre que las condiciones sean dinámicas, existirá en mayor o menor grado el llamado *error dinámico* (diferencia entre el valor instantáneo y el indicado por el instrumento): su valor depende del tipo de fluido del proceso, de su velocidad, del elemento primario (termopar, bulbo y capilar), de los medios de protección (vaina), etc. El error medio del instrumento es la media aritmética de los errores en cada punto de la medida determinados para todos los valores crecientes y decrecientes de la variable medida.

Cuando una medición se realiza con la participación de varios instrumentos, colocados unos a continuación de otros, el valor final de la medición estará constituido por los errores inherentes a cada uno de los instrumentos. Si el límite del error relativo de cada instrumento es $\pm a$, $\pm b$, $\pm c$, $\pm d$, etc., el máximo error posible en la medición será la suma de los valores anteriores, es decir:

$$+ (a + b + c + d + ...)$$

Ahora bien, como es improbable que todos los instrumentos tengan al mismo tiempo su error máximo en todas las circunstancias de la medida, suele tomarse como *error total* de una medición la raíz cuadrada de la suma algebraica de los cuadrados de los errores máximos de los instrumentos, es decir, la expresión:

$$\pm\sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + ...}$$

Por ejemplo, el error obtenido al medir un caudal con un diafragma, un transmisor electrónico de 4-20 mA c.c., un receptor y un integrador electrónicos es de:

Elementos del lazo	**Errores**
Diafragma	2%
Transmisor electrónico de 4-20 mA c.c.	0,50%
Receptor electrónico	0,50%
Integrador electrónico	0,50%
Error total de la medición	$\sqrt{2^2 + 0,5^2 + 0,5^2 + 0,5^2}$ = 2,18%

Tabla 1.1 Error de medida de caudal

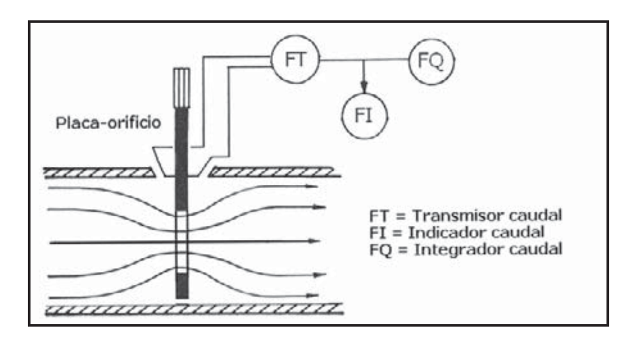


Figura 1.4 Medida de caudal con varios instrumentos

1.2.4 Incertidumbre de la medida

Cuando se realiza una operación de calibración, se compara el instrumento a calibrar con un aparato patrón para averiguar si el error (diferencia entre el valor leído por el instrumento y el verdadero valor medido con el aparato patrón) se encuentra dentro de los límites dados por el fabricante del instrumento. Como el aparato patrón no permite medir exactamente el valor verdadero (también tiene un error) y como además en la operación de comparación intervienen diversas fuentes de error, no es posible caracterizar la medida por un único valor, lo que da lugar a la llamada incertidumbre de la medida o *incertidumbre (uncertainty)*.

Entre las fuentes de incertidumbre se encuentran:

- Influencia de las condiciones ambientales.
- Lecturas diferentes de instrumentos analógicos realizadas por los operadores.
- Variaciones en las observaciones repetidas de la medida en condiciones aparentemente idénticas.
- Valores inexactos de los instrumentos patrón.
- Muestra del producto no representativa. Por ejemplo, en la medida de temperatura con un termómetro patrón de vidrio, la masa del bulbo cambia la temperatura de la muestra del proceso cuya temperatura desea medirse.

Así pues, la incertidumbre es la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al verdadero valor de la magnitud medida. En el cálculo de la incertidumbre intervienen la distribución estadística de los resultados de series de mediciones, las características de los equipos (deriva en función de la tensión de alimentación o en función de la temperatura, etc.), etc.

Para que la comparación sea correcta, el procedimiento general es que el patrón de medida sea suficiente mas preciso que la del aparato que se calibra (relación 4:1 en los sensores de presión - ISA S 37.3).

Para el cálculo de la incertidumbre pueden seguirse varias normas:

- ISO/IEC 17025:2005 *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*.
- G-ENAC-09 Rev 1 Julio 2005: Guía para la expresión de la incertidumbre en los ensayos cuantitativos.

- CEA-ENAC-LC/02 Expresión de la Incertidumbre de Medida en las Calibraciones.
- EAL-R2 *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, 1995.
- GUM (*Guide to the expression of uncertainty in measurement*), conocida tambíen como ISO/TC 213 N 659.

En el cálculo de la incertidumbre se usa el término mensurando que significa: magnitud particular objeto de una medición. Puede ser medido directamente (por ejemplo, la temperatura de un cuerpo con un termómetro) o bien de forma indirecta a partir de otras magnitudes relacionadas de forma matemática o funcional (por ejemplo, la medida de la densidad a través de la relación masa/volumen del cuerpo). El mensurando es, pues, función de una serie de magnitudes de entrada y la expresión de esta función puede ser experimental o ser un algoritmo de cálculo o bien una combinación.

Hay dos incertidumbres A y B presentes en la medición. Las A se relacionan con fuentes de error aleatorios y pueden ser evaluadas a partir de distribuciones estadísticas (lecturas en el instrumento), mientras que las B están asociadas a errores de tipo sistemático y corresponden a la incertidumbre del calibrador, la resolución del instrumento y la influencia de otras magnitudes (temperatura, campos externos, humedad, posición, etc.) que surgen del control de las condiciones de contraste o de la experiencia previa del operador.

Una vez obtenidos los valores, tanto de la incertidumbre tipo A como la de tipo B, se procede a calcular la incertidumbre combinada:

$$u_c = \sqrt{\left(u_{tipo\ A}\right)^2 + \left(u_{tipo\ B}\right)^2}$$

Y después la incertidumbre expandida:

$$U_{expandida} = K \times u_c$$

Siendo K = *Factor de cobertura o de seguridad* que se determina de acuerdo con el nivel de confianza de la incertidumbre, dado en la tabla 1.2 (factor T de Student). Con un nivel de confianza del 95,45% y para un número de valores mayor de 20 es K = 2.

N° de observaciones	**Grados de libertad**	**Nivel de confianza**					
	(n - 1)	**99%**	**98%**	**95,45%**	**90%**	**80%**	**68%**
2	1	63,66	31,82	13,97	6,31	3,08	1,82
3	2	9,92	6,96	4,53	2,92	1,89	1,31
4	3	5,84	4,54	3,31	2,35	1,64	1,19
5	4	4,6	3,75	2,87	2,13	1,53	1,13
6	5	4,03	3,36	2,65	2,02	1,48	1,1
7	6	3,71	3,14	2,52	1,94	1,44	1,08
8	7	3,5	3	2,43	1,89	1,41	1,07
9	8	3,36	2,9	2,37	1,86	1,4	1,06
10	9	3,25	2,82	2,32	1,83	1,38	1,05
11	10	3,17	2,76	2,28	1,81	1,37	1,05

N° de observaciones	Grados de libertad (n - 1)	Nivel de confianza 99%	98%	95,45%	90%	80%	68%
12	11	3,11	2,72	2,25	1,8	1,36	1,04
13	12	3,05	2,68	2,23	1,78	1,36	1,04
14	13	3,01	2,65	2,21	1,77	1,35	1,03
15	14	2,98	2,62	2,2	1,76	1,35	1,03
16	15	2,95	2,6	2,18	1,75	1,34	1,03
17	16	2,92	2,58	2,17	1,75	1,34	1,03
18	17	2,9	2,57	2,16	1,74	1,33	1,02
19	18	2,88	2,55	2,15	1,73	1,33	1,02
20	19	2,86	2,54	2,14	1,73	1,33	1,02
Infinito	Infinito	2,58	2,33	2	1,64	1,28	1

Tabla 1.2 *Valores T de Student para diferentes niveles de confianza y grados de libertad*

Incertidumbre tipo *A*. La evaluación de la incertidumbre estándar se efectúa por análisis estadístico de una serie de observaciones independientes de la magnitud de entrada, bajo las mismas condiciones de medida. Si no existen componentes evaluadas estadísticamente la evaluación de tipo A corresponde a la repetibilidad del instrumento a calibrar.

Considerando que la distribución de probabilidades de las medias de dichas variables es la curva de Gauss o de distribución normal en forma de campana, la media aritmética es el valor estimado de la variable, mientras que la desviación estándar representa el grado de dispersión de los valores de la variable que se miden repetitivamente.

Así, en una serie de medidas repetitivas de la variable, el valor estimado x viene dado por la media aritmética o promedio de los valores observados:

$$x = \frac{1}{n} x = \frac{1}{n} \sum (x_i) \text{ con } x_i \ (i = 1, 2, 3, \ldots n)$$

Y el valor estimado de la varianza experimental:

$$s^2 (x) = \frac{1}{n-1} S(x_i - \overline{x})^2$$

La mejor estimación de la varianza de la media aritmética x es la varianza experimental de la media aritmética dividida por n. Y así:

$$s^2 (x) = \frac{1}{n(n-1)} S(x_i - \overline{x})^2$$

Su raíz cuadrada positiva es la desviación típica experimental de la media aritmética que equivale a la incertidumbre típica.

$$U(\overline{x}) = s(\overline{x})$$

Cuando el número de medidas repetitivas es menor de 10, la desviación típica debe multiplicarse por un factor multiplicador.

N° de medidas (N)	Factor multiplicador (λ)	N° de medidas (N)	Factor multiplicador (λ)
2	7	6	1,3
3	2,3	7	1,3
4	1,7	8	1,2
5	1,4	9	1,2

Tabla 1.3 Factor multiplicador del número de medidas

Incertidumbre tipo *B*. La incertidumbre se determina en base a la información disponible procedente de varias fuentes, tales como:

- Datos de medidas anteriores.
- Experiencia y conocimiento de los instrumentos.
- Especificaciones del fabricante.
- Valores de incertidumbre de manuales técnicos.

El método exige un juicio basado en la experiencia y en conocimientos generales. Es una decisión científica basada en toda la información disponible que puede venir dada por resultados de medidas anteriores, por la experiencia, por las especificaciones del fabricante, por los datos suministrados por certificados de calibración u otros certificados, etc. Se asumen las distribuciones rectangular, triangular y normal según sea el criterio y la experiencia del personal.

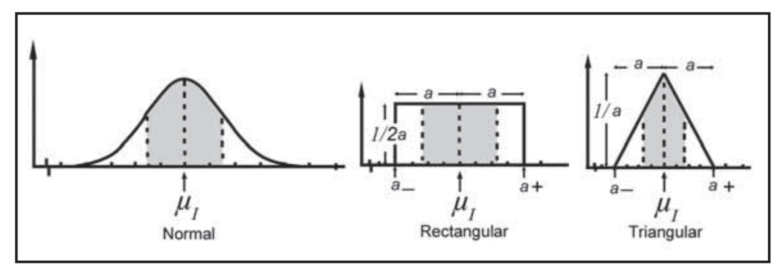




Figura 1.5 Distribuciones normal, rectangular y triangular y resolución de los instrumentos analógicos y digitales

Expresión de la distribución rectangular con un factor de cobertura de 1,65 (= 0,95 × √3) para proporcionar un nivel de confianza de aproximadamente el 95%:

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{a^2\left(diferencia\ entre\ valores\ máximos\ y\ mínimos,\ histéresis\ máxima,\ etc.\right)}{12}}$$

Si se conocen los valores máximo y mínimo a_1 y a_2 se tiene:

$$u_B^2\,(x_i) = (a_1 - a_2)^2 / 12$$

Y si se trata de un sistema centrado, $a_1 - a_2 = 2a$, y entonces:

$$u_B^2\,(x_i) = a^2 / 3$$

Distribución triangular, propia de los instrumentos analógicos:

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{a^2\left(diferencia\ entre\ valores\ máximos\ y\ mínimos,\ histéresis\ máxima,\ etc.\right)}{24}}$$

Y para la distribución normal:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Ejemplo 1: Manómetro tipo Bourdon de escala 0-4 bar (400 KPa o 4,078865 Kg/cm^2) que se calibra con un patrón (comprobador de manómetros de peso muerto) de incertidumbre 4,1 × 10^{-6} (2 × 10^{-4}), efectuándose la calibración a la temperatura de 20 ± 2 °C, y con ciclos de presiones aplicadas de subida y de bajada, que permiten comprobar si el instrumento tiene histéresis. Cada medida se realiza cuatro veces. La calibración se efectúa colocando las pesas necesarias y haciendo girar con la mano el conjunto. El giro libre indica que el pistón que soporta las pesas está flotando y que por lo tanto la presión generada es la correcta.

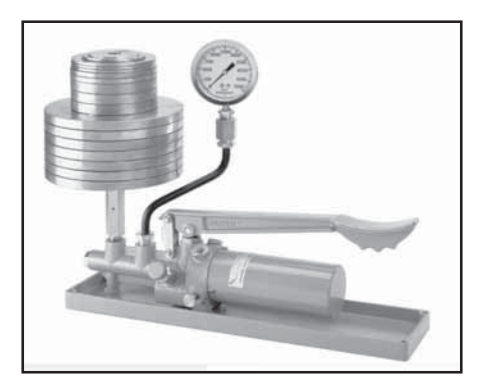


Figura 1.6 Comprobación de un manómetro con un medidor de peso muerto (dead weight tester) (Fuente: Ashcroft)

La incertidumbre debida al patrón en el fondo de escala es:

$$u_p(\text{Incertidumbre patrón}) = 4{,}1 \times 10^{-6} \times 4 = 0{,}0000164 \text{ bar} = 0{,}00164 \text{ KPa}$$

y su desviación típica, basada en las distribuciones Normal y de Student, con un nivel de confianza del 95% es de:

$$u_p = \frac{0{,}0000164}{2} = 0{,}0000082 \text{ bar} = 0{,}00082 \text{ KPa}$$

La desviación típica del patrón (variación de Presión del Patrón con la temperatura = 9 × 10^{-6}, debida a las condiciones ambientales es:

$$u_p(\text{temperatura}) = \frac{1}{3} \times 9 \times 10^{-6} \times 2 \times 4 = 0{,}000024 \text{ bar} = 0{,}0024 \text{ KPa}$$

La desviación típica de las medidas en el manómetro analógico es la máxima obtenida:

$$u_{medidas}(max) = \sqrt{\frac{0{,}012^2 \times 5}{0{,}8 + 1{,}6 + 2{,}4 + 3{,}2 + 3{,}9}} \times 1{,}7 = 0{,}0127575$$

siendo 1,7 el factor multiplicador para 4 medidas (subestimación de la incertidumbre que para 10 medidas valdría la unidad).

$$u_{medidas}\ (media) = \frac{0{,}0127575}{2} = 0{,}0063788\ bar$$

La incertidumbre experimental tipo A es:

$$u_{experimental}\ (total) = \sqrt{0{,}0000082^2 + 0{,}000024^2 + 0{,}0063788^2} = 0{,}0063788\ bar$$

En la incertidumbre tipo B, el patrón de peso muerto, tiene en el fondo de escala:

$$Incertidumbre\ patrón = 4{,}1 \times 10^{-6} \times 4 = 0{,}0000164\ bar = 0{,}00164\ KPa$$

El manómetro a calibrar tiene una escala 0-4 bar (0-400 KPa). El dígito menos significativo tiene el valor de 0,1 bar.



Figura 1.7 Manómetro analógico de escala 0-4 bar. Dígito menos significativo = 0,1 bar

Con una distribución triangular (instrumentos analógicos) se tiene:

$$Resolución\ instrumento = \frac{Valor\ medio}{\sqrt{24}} = \frac{0{,}05}{\sqrt{24}} = 0{,}0102062\ bar$$

La incertidumbre total tipo B es pues:

$$u_{tipo\ B} = \sqrt{0{,}0000164^2 + 0{,}0102062^2} = 0{,}0102062\ bar$$

La incertidumbre combinada tipo B + tipo A es:

$$u_c = \sqrt{\left(u_{tipo\ A}\right)^2 + \left(u_{tipo\ B}\right)^2} = \sqrt{0{,}0063788^2 + 0{,}0102062^2} = 0{,}01203$$

Y la incertidumbre expandida es:

$$U_{expandida} = K \times u_c = 1{,}87 \times 0{,}01203 = 0{,}022506\ bar$$

Siendo el factor de cobertura $K = 1,87$ (tabla 1.2 - Factor T de Student con un nivel de confianza del 95,45%).

Si el número de valores fuera superior a 20 es $K = 2$.

Y la expresión de la incertidumbre: $4 \pm 0,022\ bar$.

Patrón (comprobador de manómetros de peso muerto)	Manómetro (escala 0 - 4 bar = 0 - 400 KPa)	Corrección	% Escala	Incertidumbre tipo A (bar)		Incertidumbre tipo B (bar)	
bar	Valor medio (cuatro medidas sin histéresis) - bar	bar	bar	Patrón en fondo escala	0,0000164	Patrón	0,0000164
0,8	0,81	-0,01	-0,250	Desviación típica Incertidumbre (distribución normal y Student - 95% nivel de confianza)	0,0000082	Manómetro analógico (dígito menos significativo = 0,1 bar)	0,010206207
1,6	1,605	-0,005	-0,125	Desviación típica Incertidumbre patrón según temperatura	0,0000240	**Incertidumbre total tipo B (bar)**	**0,0102062**
2,4	2,395	0,005	0,125	Desviación típica máxima Incertidumbre medidas	0,0127576		
3,2	3,188	0,012	0,300	Desviación típica media Incertidumbre medidas	0,0063788	Incertidumbre combinada (tipo A + tipo B)	0,012035629
3,9	3,905	-0,005	-0,125	**Incertidumbre tipo A**	**0,0063788**	Incertidumbre expandida (K = 1,87)	0,022506625
Media		Variancia	Desviación estándar	**Expresión de la incertidumbre**			
2,38		0,000134034	0,012	**4 ± 0,022 bar**			
Nota: 1 bar = 100 KPa; 1 bar = 1,019716 Kg/cm^2 : 1 bar = 14,50377 psi							
Patrón = Medidor de peso muerto; Incertidumbre patrón = 0,0000041; Variación de presión del patrón con la temperatura = 0,000009							
Factor multiplicador para cuatro medidas = 1,7							

Tabla 1.4 Cálculo incertidumbre de un manómetro tipo Bourdon de 4 bar (400 KPa)

Ejemplo 2: Manómetro digital de escala 0-200 kPa equivalente a 0-2 bar, que se calibra con el mismo patrón anterior (comprobador de manómetros de peso muerto) de incertidumbre 4,1 $\times 10^{-6}$ (2 $\times 10^{-4}$), y en la misma forma. En el ejemplo 1 se determinó la incertidumbre debida al patrón en el fondo de escala u_p = 0,0000164 bar, su desviación típica u_p = 0,0000082 bar y la desviación típica del patrón (variación de presión con la temperatura 9 $\times 10^{-6}$), debida a las condiciones ambientales u_p *(temperatura)*= 0,000024 bar.

La desviación típica de las medidas en el manómetro digital:

$$u_{medidas}\ (max) = \sqrt{\frac{0,002^2 \times 5}{0,4 + 0,8 + 1,2 + 1,6 + 1,85}} \times 1,7 = 0,0024051$$

Y la media:

$$u_{medidas}\ (media) = \frac{0,0024051}{2} = 0,0012026\ bar$$

La incertidumbre experimental tipo A es:

$$u_{experimental}\ (total) = \sqrt{0,0000082^2 + 0,000024^2 + 0,0012026^2} = 0,0012028\ bar$$

El manómetro digital tiene una escala de 0-200 KPa (0-2 bar) y el dígito menos significativo es de 0,01 KPa (0,0001 bar), con lo que el valor medio es 0,005 KPa (0,00005 bar).



Figura 1.8 Manómetro digital de escala 0-200 KPa (0-2 bar). Dígito menos significativo 0,01 KPa = 0,0001 bar

En el manómetro digital se considera una distribución rectangular con la fórmula:

$$Resolución\ instrumento = \frac{Valor\ medio}{\sqrt{3}} = \frac{0,00005}{\sqrt{3}} = 0,0000288\ bar$$

Manómetro digital:

$$u_{tipo\ B} = \sqrt{0,0000164^2 + 0,0000288^2} = 0,0000331\ bar = 1,02\ KPa$$

La incertidumbre combinada tipo A + tipo B es:

$$u_c = \sqrt{\left(u_{tipo\ A}\right)^2 + \left(u_{tipo\ B}\right)^2} = \sqrt{0,0012028^2 + 0,0000331^2} = 0,00120329$$

Y la incertidumbre expandida con el factor de cobertura K = 1,87 es:

$$U_{expandida} = K \times u_c = 1,87 \times 0,00120329 = 0,002250152\ bar$$

Y la expresión de la incertidumbre es 2 ± 0,0022 bar, o bien, 200 ± 0,22 KPa.

Patrón (comprobador de manómetros de peso muerto)	Manómetro (escala 0 - 2 bar = 0 - 200 KPa)	Corrección	% Escala	Incertidumbre tipo A (bar)		Incertidumbre tipo B (bar) (Manómetro digital)	
bar	Valor medio (cuatro medidas sin histéresis) - bar	bar	bar	Patrón en fondo escala	0,0000164	Patrón	0,0000164
0,4	0,4005	-0,0005	-0,013	Desviación típica Incertidumbre (distribución normal y Student - 95% nivel de confianza)	0,0000082	Manómetro digital (dígito menos significativo = 0,0001 bar)	2,88675E-05
0,8	0,8001	-1E-04	-0,002	Desviación típica Incertidumbre patrón según temperatura	0,0000240	**Incertidumbre total tipo B (bar)**	**3,32E-05**
1,2	1,199	0,001	0,025	Desviación típica máxima Incertidumbre medidas	0,0024051		
1,6	1,5998	0,0002	0,005	Desviación típica media Incertidumbre medidas	0,0012026	Incertidumbre combinada (tipo A + tipo B)	0,00120329
1,85	1,8512	-0,0012	-0,030	**Incertidumbre tipo A**	**0,0012028**	Incertidumbre expandida (K = 1,87)	0,002250152
Media		Variancia	Desviación estándar	**Expresión de la incertidumbre (manómetro digital)**			
1,17		2,34E-06	0,002	**2 ± 0,0022 bar (200 ± 2,2 KPa)**			

Tabla 1.5 Cálculo incertidumbre de un manómetro digital de 200 KPa (2 bar)

1.2.5 Exactitud

La *exactitud* (*accuracy*) es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al valor verdadero de la magnitud medida.

En otras palabras, es el grado de conformidad de un valor indicado a un valor estándar aceptado o valor ideal, considerando este valor ideal como si fuera el verdadero. El grado de conformidad independiente es la desviación máxima entre la curva de calibración de un instrumento y una curva característica especificada, posicionada de tal modo tal que se reduce al mínimo dicha desviación máxima.

La exactitud (*accuracy*) define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio durante un período de tiempo determinado (normalmente 1 año). La exactitud se da en términos de inexactitud, es decir, un instrumento de temperatura de 0-100 °C con temperatura del proceso de 100 °C y que marca 99,98 °C se aproxima al valor real en 0,02 °C, o sea tiene una inexactitud de 0,02 °C. Hay varias formas para expresar la exactitud:

a) Tanto por ciento del alcance, campo de medida (*range*). Ejemplo: en el instrumento de temperatura de la figura 1.3, para una lectura de 150 °C y una exactitud de ± 0,5%, el valor real de la temperatura estará comprendido entre 150 ± 0,5 × 200/100 = 150 ± 1, es decir, entre 149 °C y 151 °C.

b) Directamente, en unidades de la variable medida. Ejemplo: exactitud ± 1 °C.
c) Tanto por ciento de la lectura efectuada. Ejemplo: exactitud de ± 1% de 150 °C, es decir, ± 1,5 °C.
d) Tanto por ciento del valor máximo del campo de medida. Ejemplo: exactitud ± 0,5% de 300 °C = ± 1,5 °C.
e) Tanto por ciento de la longitud de la escala. Ejemplo: si la longitud de la escala del instrumento de la figura 1.3 es de 150 mm, la exactitud de ± 0,5% representará ± 0,75 mm en la escala.

La exactitud varía en cada punto del campo de medida sí bien, el fabricante la especifica, en todo el margen del instrumento, indicando a veces su valor en algunas zonas de la escala. Por ejemplo: un manómetro puede tener una exactitud de ± 1% en toda la escala y de ± 0,5% en la zona central. Cuando se desea obtener la máxima exactitud del instrumento en un punto determinado de la escala, puede calibrarse únicamente para este punto de trabajo, sin considerar los valores restantes del campo de medida. Por ejemplo: un termómetro de 0-150 °C y de ± 1% de exactitud situado en un baño de temperatura constante a 80 °C, puede ser calibrado a este valor, de modo que su exactitud en este punto de trabajo será la máxima que se pueda obtener con un termómetro patrón. Es obvio que para los valores restantes, en particular los correspondientes a los extremos de la escala, la exactitud se apartará de ± 1%.

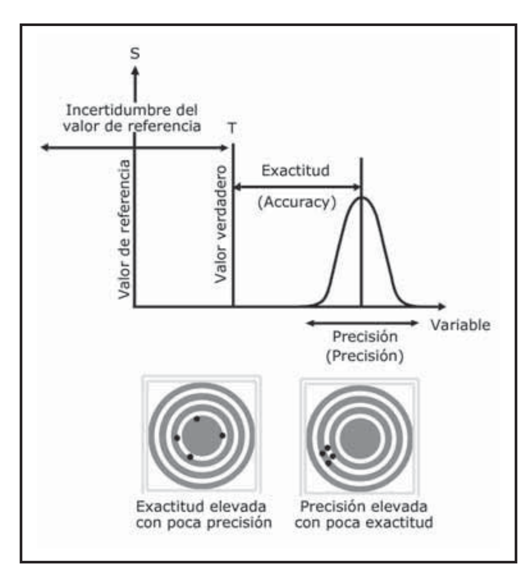


Figura 1.9 Exactitud y precisión

Hay que señalar que los valores de la exactitud de un instrumento se consideran, en general, establecidos para el usuario, es decir, son los proporcionados por los fabricantes de los instrumentos. Sin embargo, estos últimos también suelen considerar los valores de calibración en fábrica y de inspección. Por ejemplo, un instrumento que en fábrica tiene una exactitud de calibración de ± 0,8%, en inspección le corresponde ± 0,9% y la dada al usuario es ± 1%

Con ello, se pretende tener un margen de seguridad para compensar los efectos de las diferencias de apreciación de las personas que efectúan la calibración, las diferentes exactitudes de los instrumentos de medida utilizados, las posibles alteraciones debidas al desplazamiento del instrumento de un punto a otro, los efectos ambientales y de envejecimiento, etc.

1.2.6 Precisión

La *precisión (precision)* es la cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras, es decir, es el grado de dispersión de las mismas. Un instrumento puede tener una pobre exactitud, pero una gran precisión. Por ejemplo, un manómetro de intervalo de medida de 0 a 10 bar, puede tener un error de cero considerable marcando 2 bar sin presión en el proceso y diversas lecturas de 7,049, 7,05, 7,051, 7,052 efectuadas a lo largo del tiempo y en las mismas condiciones de servicio, para una presión del proceso de 5 bar. Tendrá un error práctico de 2 bar, pero los valores leídos estarán muy próximos entre sí con una muy pequeña dispersión máxima de 7,052 - 7,049 = 0,003, es decir, el instrumento tendrá una gran precisión .

Por lo tanto, los instrumentos de medida estarán diseñados por los fabricantes para que sean precisos, y como periódicamente se descalibran, deben reajustarse para que sean exactos. A señalar que el término precisión es sinónimo de repetibilidad.

1.2.7 Zona muerta

La *zona muerta* (*dead zone* o *dead band*) es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce su respuesta. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida. Por ejemplo: en el instrumento de la figura 1.3 es de ± 0,1%, es decir, de 0,1 × 200/100 = ± 0,2 °C.

1.2.8 Sensibilidad

La *sensibilidad* (*sensitivity*) es la razón entre el incremento de la señal de salida o de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo. Por ejemplo, si en un transmisor electrónico de 0-10 bar, la presión pasa de 5 a 5,5 bar y la señal de salida de 11,9 a 12,3 mA c.c., la sensibilidad es el cociente:

$$\frac{(12,3-11,9)/(20-4)}{(5,5-5)/10} = \pm\ 0,5 \text{ mA c.c./bar}$$

Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida. Si la sensibilidad del instrumento de temperatura de la figura 1.3 es de ± 0,05%, su valor será de 0,05 × 200 = ± 0,1 °C.

Hay que señalar que no debe confundirse la sensibilidad con el término de zona muerta; son definiciones básicamente distintas que antes era fácil confundir cuando la definición inicial de la sensibilidad era “valor mínimo en que se ha de modificar la variable para apreciar un cambio medible en el índice o en la pluma de registro de los instrumentos”.

1.2.9 Repetibilidad

La *repetibilidad* (*repeatibility*) es la capacidad de reproducción de las posiciones de la pluma o del índice o de la señal de salida del instrumento, al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo. La repetibilidad es sinónimo de precisión. A mayor repetibilidad, es decir, a un menor valor numérico (por ejemplo, si en un instrumento es 0,05% y en otro es 0,005%, este segundo tendrá más repetibilidad), los valores de la indicación o señal de salida estarán mas concentrados, es decir, habrá menos dispersión y una mayor precisión.

La repetibilidad se expresa en tanto por ciento del alcance; un valor representativo es el de ± 0,1%. Nótese que el término repetibilidad no incluye la histéresis (figura 1.3b). Para determinarla, el fabricante comprueba la diferencia entre el valor verdadero de la variable y la indicación o señal de salida del instrumento recorriendo todo el campo, y partiendo, para cada determinación, desde el valor mínimo del campo de medida. De este modo, en el caso de un manómetro puede haber anotado los siguientes datos relacionados.

Ítem	Variable	Indicación	Diferencia	Cuadrado diferencia	Ítem	Variable	Indicación	Diferencia	Cuadrado diferencia
1	0,5	0,502	-0,002	4E-06	11	5	5,01	-0,01	1E-04
2	1	1,006	-0,006	3,6E-05	12	5,5	5,505	-0,005	2,5E-05
3	1,5	1,509	-0,009	8,1E-05	13	6	6,006	-0,006	3,6E-05
4	2	2,008	-0,008	6,4E-05	14	6,5	6,501	-0,001	1E-06
5	2,5	2,506	-0,006	3,6E-05	15	7	7,003	-0,003	9E-06
6	3	3,007	-0,007	4,9E-05	16	7,5	7,504	-0,004	1,6E-05
7	3,5	3,503	-0,003	9E-06	17	8	8,009	-0,009	8,1E-05
8	4	4,006	-0,006	3,6E-05	18	8,5	8,508	-0,008	6,4E-05
9	4,5	4,507	-0,007	4,9E-05	19	9	9,008	-0,008	6,4E-05
10	10	10,005	-0,005	2,5E-05				0	0
Suma de cuadrados de las diferencias				0,000389	Suma de cuadrados de las diferencias				0,000396
Suma total de cuadrados de las diferencias/N									4,13158E-05
Repetibilidad = Raíz cuadrada (Suma total de cuadrados de las diferencias/N)									**0,00642774**

Tabla 1.6 *Valoración de la repetibilidad*

La repetibilidad viene dada por la fórmula:

$$\sqrt{\frac{\sum (x_i - x)^2}{N}}$$

Resultando:

$$\sqrt{\frac{0,00078}{19}} = \pm\, 0,0064$$

1.2.10 Histéresis

La *histéresis* (*hysteresis*) es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el índice o la pluma del instrumento o la señal de salida para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos, ascendente y descendente.

Se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida. Por ejemplo: si en un termómetro de 0-100%, para el valor de la variable de 40 °C, la aguja marca 39,9 °Cal subir la temperatura desde 0 °C, e indica 40,1 °C al bajar la temperatura desde 100 °C, el valor de la histéresis es de:

$$\frac{40,1 - 39,9}{100 - 0} \text{ x } 100 = \pm\, 0,2\%$$

En la figura 1.3c pueden verse las curvas de histéresis que están dibujadas exageradamente para apreciar bien su forma. Hay que señalar que el término “zona muerta” está incluido dentro de la histéresis.

1.2.11 Otros términos

Otros términos empleados en las especificaciones de los instrumentos son los siguientes:

Campo de medida con elevación de cero

Es aquel campo de medida en el que el valor cero de la variable o señal medida es mayor que el valor inferior del campo. Por ejemplo, -10 °C a 30 °C.

Campo de medida con supresión de cero

Es aquel campo de medida en el que el valor cero de la variable o señal medida es menor que el valor inferior del campo. Por ejemplo, 20 °C a 60 °C.

Elevación de cero

Es la cantidad con que el valor cero de la variable supera el valor inferior del campo. Puede expresarse en unidades de la variable medida o en % del alcance. Por ejemplo, 10 °C en el campo -10 °C a 30 °C del instrumento, o sea (10/40) × 100 = 25%.

Supresión de cero

Es la cantidad con que el valor inferior del campo supera el valor cero de la variable. Puede expresarse en unidades de la variable medida o en % del alcance. Por ejemplo, 20 °C en el campo 20 °C a 60 °C del instrumento, o sea (20/40) × 100 = 50%.

Deriva

Es una variación en la señal de salida que se presenta en un período de tiempo determinado mientras se mantienen constantes la variable medida y todas las condiciones ambientales. Se suelen considerar la deriva de cero (variación en la señal de salida para el valor cero de la medida atribuible a cualquier causa interna) y la deriva térmica de cero (variación en la señal de salida a medida cero, debida a los efectos únicos de la temperatura).

La deriva está expresada usualmente en porcentaje de la señal de salida de la escala total a la temperatura ambiente, por unidad, o por intervalo de variación de la temperatura. Por ejemplo, la deriva térmica de cero de un instrumento en condiciones de temperatura ambiente durante 1 mes fue de 0,2% del alcance.

Fiabilidad

Medida de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de límites especificados de error a lo largo de un tiempo determinado y bajo unas condiciones especificadas.

Resolución

Es la menor diferencia de valor que el instrumento puede distinguir. En los instrumentos analógicos interviene el operador según donde observe la posición de la aguja, su error de paralaje en la lectura efectuada y la distancia entre los valores marcados en la escala.

Por ejemplo, en un indicador de nivel de 0% a 100% graduado cada 1% de la escala, con la aguja indicadora, que el observador considera en la mitad entre las divisiones 52% y 53%, y que el afirma que es capaz de discriminar valores del 0,5%, podrá considerarse la resolución como (0,5/100) = 0,05%.

En los instrumentos digitales, la resolución es el cambio de valor de la variable que ocasiona que el dígito menos significativo se modifique. Por ejemplo, un indicador digital de temperatura en el que se lee 531,01 °C, el dígito menos significativo es el último 1.

Luego, si la temperatura aumenta a 531,02 °C, la resolución es de ((531,02 - 531,01)/100) = 0,00001%, lo cual no significa en absoluto que esta sea la exactitud del instrumento.

Resolución infinita

Capacidad de proporcionar una señal de salida progresiva y continua en todo el campo de trabajo del instrumento.

Trazabilidad

Propiedad del resultado de las mediciones efectuadas con un instrumento o con un patrón, tal que puede relacionarse con patrones nacionales o internacionales, mediante una cadena ininterrumpida de comparaciones y con todas las incertidumbres determinadas.

Ruido

Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseada que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados. Un caso especial es la interferencia de radiotransmisores RFI (*Radio Frequency Interference*).

Puede expresarse en unidades de la señal de salida o en tanto por ciento del alcance.

Linealidad

La aproximación de una curva de calibración a una línea recta especificada.

Linealidad basada en puntos

Falta de linealidad expresada en forma de desviación máxima con relación a una línea recta que pasa a través de los puntos dados correspondientes al cero y al 100% de la variable medida.

Temperatura de servicio

Campo de temperaturas en el cual se espera que trabaje el instrumento dentro de unos límites de error especificados.

Vida útil de servicio

Tiempo mínimo especificado durante el cual se aplican las características de servicio continuo e intermitente del instrumento sin que se presenten cambios en su comportamiento, más allá de tolerancias especificadas.

Reproductibilidad

Capacidad de reproducción de un instrumento de las medidas repetitivas de la lectura o señal de salida para el mismo valor de la variable medida alcanzado en ambos sentidos, en las mismas condiciones de servicio y a lo largo de un período de tiempo determinado.

Por ejemplo, un valor representativo sería ± 0,2% del alcance de la lectura o señal de salida a lo largo de un período de 30 días.

Respuesta frecuencial

Variación con la frecuencia de la relación de amplitudes señal de salida/variable medida (y de la diferencia de fases entre la salida y la variable medida) para una medida de variación senoidal aplicada a un instrumento dentro de un campo establecido de frecuencias de la variable medida.

Se especifica usualmente como "dentro de ± ...% de ... a ... Hz".

1.2.12 Ejemplos generales de características de instrumentos

En la figura 1.10 pueden verse tres tipos de instrumentos cuyas características son:

- **Termómetro bimetálico**

  Intervalo de medida (*range*) = 0-100 °C

  Alcance (*span*) = 100

  Exactitud (*accuracy*) = ± 0,5%

  Repetibilidad (*repeatibility*) = ± 0,1%

  Histéresis (*hysteresis*) = ± 0,2%

  Incertidumbre (*uncertainty*) = ± 0,13%

- **Transmisor de caudal digital multivariable por presión diferencial con compensación de presión y temperatura**

  Intervalo de medida (*range*) = 0-2,5 hasta 0-1000 mbar (0-1 hasta 0-400" c.d.a.)

  Alcance (*span*) de la presión diferencial = 2,5 a 1000 mbar / 1 a 400" c.d.a.

  Alcance (*span*) de la presión absoluta = 0,35 a 52 bar / 5 a 750 psia

  Alcance (*span*) de la presión relativa = 4,1 a 200 bar / 60 a 3.000 psig

  Exactitud (*accuracy*) de la presión diferencial = ± 0,1% del alcance

  Exactitud (*accuracy*) de la presión absoluta = ± 0,1% del alcance

  Exactitud (*accuracy*) de la temperatura = ± 1 °C ± 0,025% del alcance

  Limites de temperatura ambiente = -40 °C a 85 °C (-40 °F a 185 °F)

  Alimentación = 85 a 260 V c.a.

  Señal de salida = 20 mA c.c. o protocolo HART

- **Controlador digital universal**

  Entrada por termopar, sonda de resistencia, mV, 0-5 V, 1-5 V, 0-20 mA c.c., 4-20 mA c.c., reostato

  Exactitud (*accuracy*) = ± 0,20% del máximo de la escala

  Resolución 16 bits

  Velocidad de muestreo (*scan rate*) = 6 veces/segundo (166 ms)

  Resolución = cuatro veces mayor que la digital de la pantalla

  Algoritmos de control = todo-nada, proporcional en tiempo, dúplex proporcional en corriente, proporcional en posición

  Salida en señal continua lineal: 0 a 20 mA c.c., 4-20 mA c.c., 8 bits en 50 ms o 10 bits en 1 segundo.

  Salida por relé electromecánico = 5 A resistivo 240 V c.a. máx. 3 A inductivo 240 V c.a. máx.

  Salida por relé de estado sólido = 1 A resistivo 240 V c.a. máx. 50 VA inductivo 240 V c.a. máx.

  N° de alarmas = 2 (5 A resistivo 240 V c.a. máximo)

  Limites de temperatura ambiente = 0 °C a 55 °C (32 °F a 131 °F), 20% a 95% H.R.

Alimentación = 120/240 V c.a. / 22 a 65 V c.c.

Comunicaciones = RS422/485 a 4800, 9600, 19200 o 38400 baudios (bits/seg)
Ethernet TCP/IP (10Base-T, 100 m máx.)
Infrarrojas (serie infrarroja 1 m, 19200 o 38400 baudios (bits/seg)

Consumo = 20 VA máx. (90 a 264 V c.a.), 15 VA máx. (24 V c.a./c.c.)



Figura 1.10 *Termómetro bimetálico, transmisor digital de caudal, controlador digital.*
Fuente: WIKA y Honeywell

1.3 Clases de instrumentos

Los instrumentos de medición y de control son relativamente complejos y su función puede comprenderse bien si están incluidos dentro de una clasificación adecuada. Como es lógico, pueden existir varias formas para clasificar los instrumentos, cada una de ellas con sus propias ventajas y limitaciones.

Se considerarán dos clasificaciones básicas: la primera relacionada con la función del instrumento y la segunda con la variable del proceso.

1.3.1 En función del instrumento

De acuerdo con la función del instrumento, obtenemos las formas siguientes:

Instrumentos *ciegos* (figura 1.11), son aquellos que no tienen indicación visible de la variable. Hay que hacer notar que son ciegos los instrumentos de alarma, tales como presostatos y termostatos (interruptores de presión y temperatura respectivamente) que poseen una escala exterior con un índice de selección de la variable, ya que sólo ajustan el punto de disparo del interruptor o conmutador al cruzar la variable el valor seleccionado. Son también instrumentos ciegos los transmisores de caudal, presión, nivel y temperatura sin indicación.



Figura 1.11 *Instrumentos ciegos*

Los instrumentos *indicadores* (figura 1.12) disponen de un índice y de una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable. Según la amplitud de la escala se dividen en indicadores concéntricos y excéntricos. Existen también indicadores digitales que muestran la variable en forma numérica con dígitos.

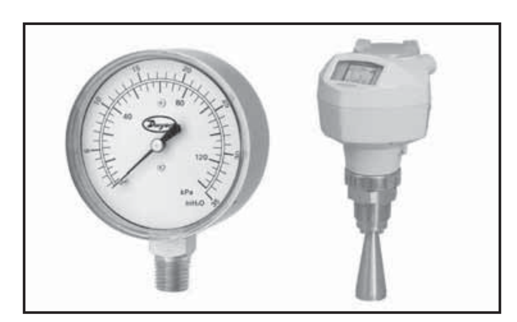


Figura 1.12 *Instrumentos indicadores*

Los instrumentos *registradores* (figura 1.13) registran con trazo continuo o a puntos la variable, y pueden ser circulares o de gráfico rectangular o alargado según sea la forma del gráfico.

Los registradores de gráfico circular suelen tener el gráfico de 1 revolución en 24 horas mientras que en los de gráfico rectangular la velocidad normal del gráfico es de unos 20 mm/hora.

A señalar que los registradores sin papel (*paperless recorders*) tienen un coste de operación reducido, una mejor exactitud y pueden incorporar funciones de captura de datos, lo que los hace ideales para procesos discontinuos (*batch process*). Se pueden conectar a una red LAN, lo que permite un fácil acceso de los datos a los varios departamentos de la empresa.

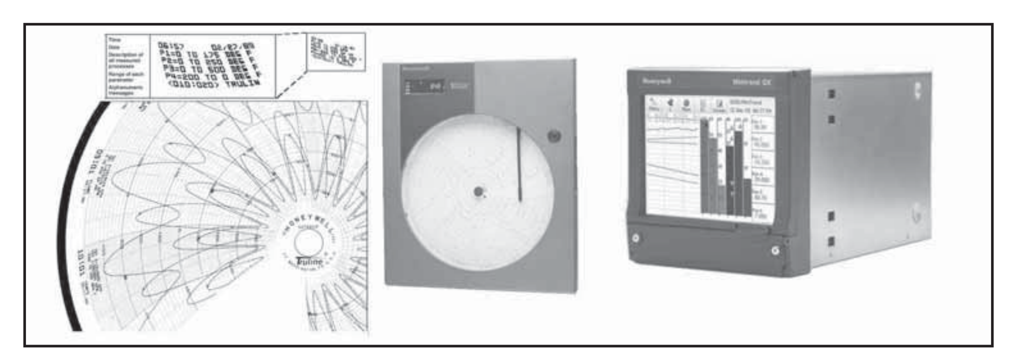


Figura 1.13 *Instrumentos registradores (circular y rectangular sin papel). Fuente: Honeywell*

Los *sensores* captan el valor de la variable de proceso y envían una señal de salida predeterminada. El sensor puede formar parte de otro instrumento (por ejemplo, un transmisor) o bien puede estar separado. También se denomina *detector* o *elemento primario* (figura 1.14) por estar en contacto con la variable, con lo que utiliza o absorbe energía del medio controlado para dar, al sistema de medición, una indicación en respuesta a la variación de la variable. El efecto producido por el elemento primario puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, medida eléctrica, etc.

Por ejemplo: en los elementos primarios de temperatura de bulbo y capilar, el efecto es la variación de presión del fluido que los llena y en los de termopar se presenta una variación de fuerza electromotriz.

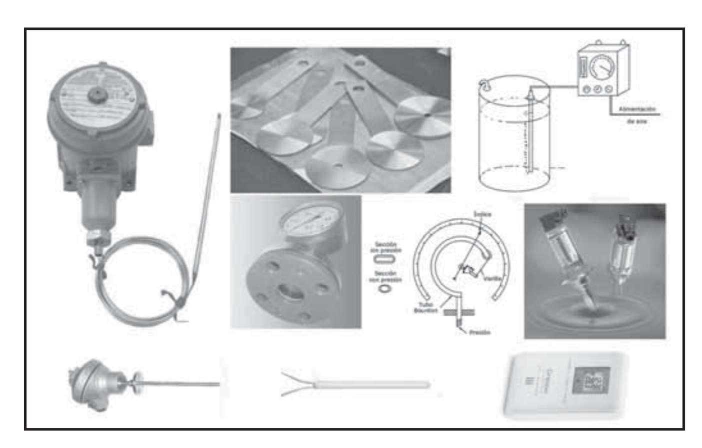


Figura 1.14 *Sensores y elementos primarios*

Los *transmisores* (figura 1.15) captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática de margen 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) o electrónica de 4 a 20 mA de corriente continua o digital. La señal neumática de 3 a 15 psi equivale a 0,206-1,033 bar por lo cual, también se emplea la señal en unidades métricas 0,2 a 1 bar. Asimismo, se emplean señales electrónicas de 1 a 5 mA c.c., de 10 a 50 mA c.c. y de 0 a 20 mA c.c., si bien la señal normalizada es de 4-20 mA c.c.

La señal digital es la más ampliamente utilizada y es apta directamente para las comunicaciones, ya que utiliza protocolos estándar.

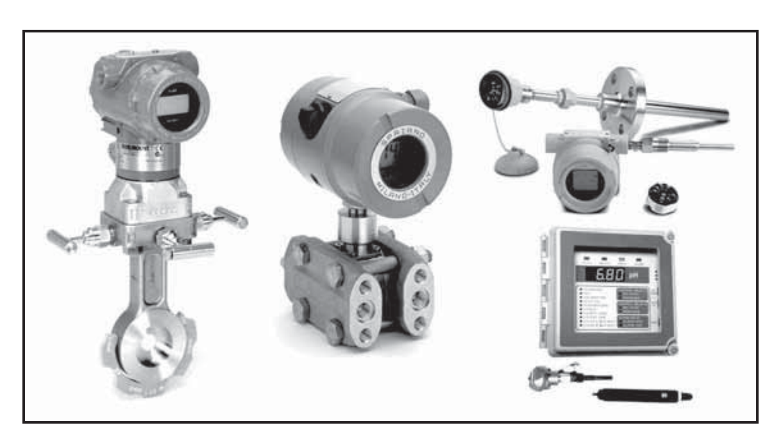


Figura 1.15 Transmisores

El sensor puede formar parte integral, o no, del transmisor; el primer caso lo constituye un transmisor de temperatura de bulbo y capilar y el segundo un transmisor de caudal con la placa orificio como elemento primario.

Los *transductores* reciben una señal de entrada función de una o más cantidades físicas y la convierten modificada o no a una señal de salida, es decir, convierten la energía de entrada de una forma a energía de salida en otra forma. Son transductores, un relé, un elemento primario, un transmisor, un convertidor PP/I (presión de proceso a intensidad), un convertidor PP/P (presión de proceso a señal neumática), etc.

Los *convertidores* son aparatos que reciben una señal de entrada neumática (3-15 psi) o electrónica (4-20 mA c.c.) procedente de un instrumento y después de modificarla (convertirla) envían la resultante en forma de señal de salida estándar. Ejemplo: un convertidor P/I (señal de entrada neumática a señal de salida electrónica, un convertidor I/P (señal de entrada eléctrica a señal de salida neumática).

Conviene señalar que a veces se confunde convertidor con transductor. Este último término es general y no debe aplicarse a un aparato que convierta una señal de instrumentos.

Los *receptores* reciben las señales procedentes de los transmisores y las indican o registran. Los receptores controladores envían otra señal de salida normalizada a los valores ya indicados 3-15 psi en señal neumática o 4-20 mA c.c. en señal electrónica, que actúan sobre el elemento final de control.

Los *controladores* (figura 1.16) comparan la variable controlada (presión, nivel, temperatura) con un valor deseado y ejercen una acción correctiva de acuerdo con la desviación. La variable controlada la pueden recibir directamente como controladores locales o bien indirectamente en forma de señal neumática, electrónica o digital procedente de un transmisor.

El elemento final de control (figura 1.17) recibe la señal del controlador y modifica su posición variando el caudal de fluido.

En el control neumático, el elemento suele ser una válvula neumática o un servomotor neumático que efectúan su acción completa de 3 a 15 psi (0,2-1 bar). En el control electrónico o digital, la válvula o el servomotor anteriores son accionados a través de un convertidor de intensidad a presión (I/P) o señal digital a presión que convierte la señal electrónica de 4 a 20 mA c.c. o digital a neumática 3-15 psi.

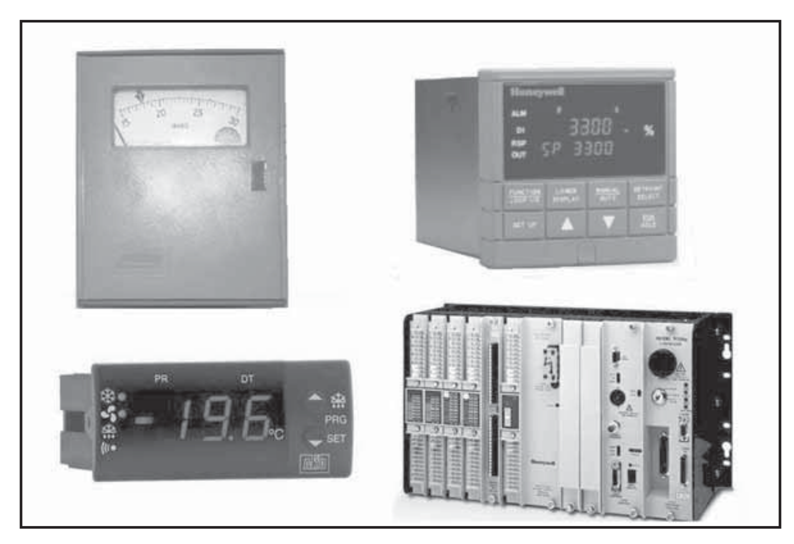


Figura 1.16 Controladores

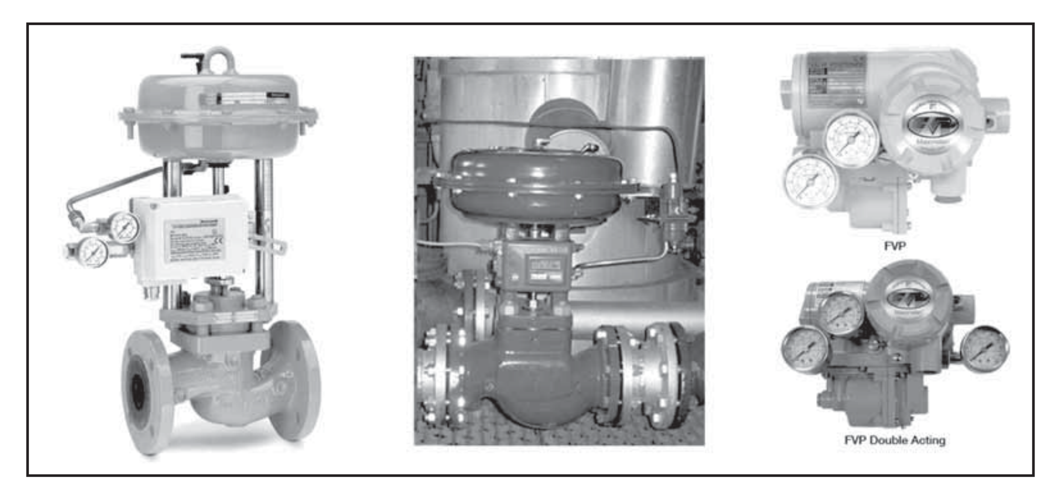


Figura 1.17 Elemento final de control

En el control eléctrico el elemento suele ser una válvula motorizada que efectúa su carrera completa accionada por un servomotor eléctrico.

En el control electrónico y, en particular, en regulación de temperatura de hornos eléctricos pueden utilizarse rectificadores de silicio (*tiristores*). Estos se comportan esencialmente como bobinas de impedancia variable y varían la corriente de alimentación de las resistencias del horno, en la misma forma en que una válvula de control cambia el caudal de fluido en una tubería.

Las señales neumática (3-15 psi o 0,2-1 bar) y electrónica (4-20 mA c.c.) permiten el intercambio entre instrumentos de la planta. En los instrumentos de señal de salida digital (transmisores, controladores) las señales son propias de cada suministrador, si bien estas señales están normalizadas por parte de las firmas de instrumentos de control (Bailey, Foxboro, Honeywell, Rosemount y otros) que aplican un lenguaje o protocolo de comunicaciones (*HART*, *Profibus*, y *FOUNDATION(TM) fieldbus*).

El comité ISA 103 con la norma de interfase entre instrumentos de campo y los sistemas de control IEC-65C/398/NP, se integra en lo que se llama FDT (*Field Device Tool*) como sistema universal de automatización de las plantas.

Otras normalizaciones se realizan en procesos discontinuos. La norma NAMUR fue creada por empresas químicas y farmacéuticas tales como AK20, BASF, BAYER, CIBA-GEIGY, etc., que definen la misma programación para fábricas distintas con el fin de obtener productos con la misma calidad.

1.3.2 En función de la variable de proceso

Expresados en función de la variable del proceso, los instrumentos se dividen en instrumentos de caudal, nivel, presión, temperatura, densidad y peso específico, humedad y punto de rocío, viscosidad, posición, velocidad, pH, conductividad, frecuencia, fuerza, turbidez, etc.

Esta clasificación corresponde específicamente al tipo de las señales medidas siendo independiente del sistema empleado en la conversión de la señal de proceso. De este modo, un transmisor electrónico o digital de temperatura del tipo de bulbo y capilar es un instrumento de temperatura a pesar de que la medida se efectúa convirtiendo las variaciones de presión del fluido que llena el bulbo y el capilar; el aparato receptor de la señal electrónica o digital del transmisor anterior es un instrumento de temperatura, si bien, al ser receptor electrónico o digital lo podríamos considerar instrumento de presión, caudal, nivel o cualquier otra variable, según fuera la señal medida por el transmisor correspondiente; un registrador potenciométrico puede ser un instrumento de temperatura, de conductividad o de velocidad, según sean las señales medidas por los elementos primarios de termopar, electrodos o dínamo.

Asimismo, esta clasificación es independiente del número y tipo de transductores existentes entre el elemento primario y el instrumento final. Así ocurre en el caso de un lazo de control de nivel compuesto por un transmisor digital de nivel, un receptor controlador con salida de 4-20 mA c.c., un convertidor intensidad-presión (I/P) que transforma la señal de 4-20 mA c.c. a neumática de 3-15 psi y la válvula neumática de control; todos estos instrumentos se consideran de nivel.

En la designación del instrumento se utilizan, en el lenguaje común, las dos clasificaciones expuestas anteriormente. Y de este modo, se consideran instrumentos tales como transmisores ciegos de presión, controladores registradores de temperatura, receptores indicadores de nivel, receptores controladores registradores de caudal, etc.

Los instrumentos se consideran instrumentos de campo y de panel (figura 1.18). La primera designación incluye los instrumentos locales situados en el proceso o en sus proximidades (es decir, en tanques, tuberías, secadores, etc.), mientras que la segunda se refiere a los instrumentos montados en paneles, armarios o pupitres situados en zonas aisladas o en zonas del proceso.

1.3.3 Código de identificación de los instrumentos

Para designar y representar los instrumentos de medición y control se emplean normas muy variadas que a veces varían de industria en industria. Esta gran variedad de normas y sistemas utilizados en las organizaciones industriales indica la necesidad universal de una normalización en este campo. Varias sociedades han dirigido sus esfuerzos en este sentido, y entre ellas se encuentran, como más importantes, la ISA (*Instrument Society of America*) de la Sociedad de Instrumentos de Estados Unidos y la DIN alemana, cuyas normas tienen por objeto establecer sistemas de designación (código y símbolos) de aplicación a las industrias químicas, petroquímicas, aire acondicionado, etc.

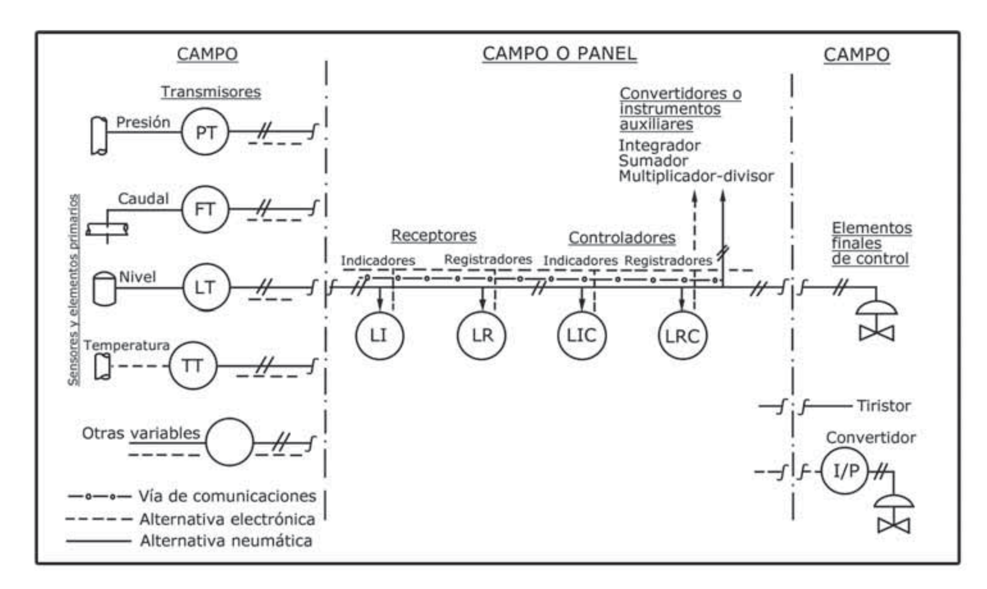


Figura 1.18 *Instrumentos de campo y de panel*

Hay que señalar al lector que estas normas no son de uso obligatorio sino que constituyen una recomendación a seguir en la identificación de los instrumentos en la industria.

Figura a continuación un resumen de las normas sobre instrumentación de medición y control ISA-S5.1-84 de ANSI/ISA del año 1984 con una revisión el 13 de julio del año 1992, de las normas sobre símbolos de operaciones binarias de procesos (*Binary Logic Diagrams for Process Operations*) ISA-S5.2-76 del año 1976 revisadas el 13 de julio de 1992, de las normas sobre símbolos de sistemas de microprocesadores con control compartido (*Graphic Symbols for Distributed Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems*) ISA-S5.3 1983, ejemplos de diagramas de lazos de control según la norma ANSI/ISA-S5.4-1991 del 9 de septiembre de 1991, el estándar de colores de visualización de procesos ANSI/ISA-S5.5-1985 (aprobada el 3 de febrero de 1986).

1.3.3.1 Resumen norma ISA-S5.1-84 (R-1992)

A) Cada instrumento debe identificarse con un código alfanumérico o número de *tag* (*tag number*) que contenga el número de identificación del lazo. Una identificación representativa es la siguiente:

TIC	103	- Identificación del instrumento
T	103	- Identificación del lazo
	103	- Número del lazo
TIC		- Identificación funcional
T		- Primera letra
IC		- Letras sucesivas

B) El número de letras funcionales para un instrumento debe ser mínimo, no excediendo de cuatro. Para ello conviene:

   1) Disponer las letras en subgrupos. Por ejemplo, un controlador de temperatura con un interruptor de alarma puede identificarse con dos círculos, uno el *TIC-3* y el otro *TSH-3*.
   2) En un instrumento que indica y registra la misma variable medida puede omitirse la letra *I* (indicación).

C) La numeración de bucles puede ser paralela o serie. La numeración paralela inicia una secuencia numérica para cada nueva primera letra (*TIC-100*, *FRC-100*, *LIC-100*, *AI-100*, etc.). La numeración serie identifica los bucles de instrumentos de un proyecto o secciones de un proyecto con una secuencia única de números, sin tener en cuenta la primera letra del bucle (*TIC-100*, *FRC-101*, *LIC-102*, *AI-103*, etc.).

   La secuencia puede empezar con el número *1* o cualquier otro número conveniente, tal como *001*, *301* o *1201* y puede incorporar información codificada tal como área de planta; sin embargo, se recomienda simplicidad.

D) Si un bucle dado tiene más de un instrumento con la misma identificación funcional, es preferible añadir un sufijo, ejemplo *FV-2A*, *FV-2B*, *FV-2C*, etc., o *TE-25-1*, *TE-25-2*, *TE-25-3*, etc.

   Estos sufijos pueden añadirse obedeciendo a las siguientes reglas:

   1. Deben emplearse letras mayúsculas *A*, *B*, *C*, etc.
   2. En un instrumento tal como un registrador de temperatura multipunto que imprime números para identificación de los puntos, los elementos primarios pueden numerarse *TE-25-1*, *TE-25-2*, *TE-25-3*, etc.
   3. Las subdivisiones interiores de un bucle pueden designarse por sufijos formados por letras y números.

E) Un instrumento que realiza dos o más funciones puede designarse por todas sus funciones. Por ejemplo, un registrador de caudal *FR-2* con pluma de presión *PR-4* puede designarse *FR-2/PR-4*. Un registrador de presión de dos plumas como *PR-7/8*; y una ventanilla de alarma para temperatura alta y baja como *TAH/L-21*.

F) Los accesorios para instrumentos tales como rotámetros de purga, filtros manorreductores y potes de sello que no están representados explícitamente en un diagrama de flujo, pero que necesitan una identificación para otros usos, deben tenerla de acuerdo con su función y deben emplear el mismo número del bucle que el del instrumento asociado.

   Alternativamente, los accesorios pueden emplear el mismo número de identificación que el de sus instrumentos asociados, pero con palabras aclaratorias. Por consiguiente, una brida para una placa-orificio *FE-7* debe designarse como *FX-7* o bien como *FE-7 BRIDAS*.

   Un rotámetro regulador de purga asociado con un manómetro *PI-8* puede identificarse como *PI-8 PURGA*. Una sonda empleada con un termómetro *TI-9* será *TW-9*, o bien, *TI-9 SONDA*.

	PRIMERA LETRA (4)		LETRAS SUCESIVAS (3)		
	Variable medida o inicial	**Letra de modificación**	**Lectura o función de lectura pasiva**	**Función de salida**	**Letra de modificación**
A	Análisis(5, 19)		Alarma		
B	Quemador, combustión		Libre(1)	Libre(1)	Libre(1)
C	Libre (1)			Control (13)	
D	Libre (1)	Diferencial (4)			
E	Tensión (f.e.m.)		Sensor (Elemento primario)		
F	Caudal	Relación (4)			
G	Libre (1)		Vidrio, Dispositivo visión (9)		
H	Manual				Alto (7,15,16)
I	Corriente (eléctrica)		Indicar (10)		
J	Potencia	Exploración (7)			
K	Tiempo, programación tiempo	Variación de tiempo (4,21)		Estación de control (22)	
L	Nivel		Luz (11)		Bajo (7,15,16)
M	Libre (1)	Momentáneo (4)			Medio, Intermedio (7,15)
N	Libre (1)		Libre (1)	Libre (1)	Libre (1)
O	Libre (1)		Orificio, Restricción		
P	Presión, Vacío		Punto (Ensayo) Conexión		
Q	Cantidad	Integrar, Totalizar (4)			
R	Radiación		Registro (17)		
S	Velocidad, Frecuencia	Seguridad (8)		Interruptor (13)	
T	Temperatura			Transmisión (18)	
U	Multivariable (6)		Multifunción (12)	Multifunción (12)	Multifunción (12)
V	Vibración, Análisis mecánico (19)			Válvula, Regulador tiro, Persiana (13)	
W	Peso, fuerza		Vaina, Sonda		
X	Sin clasificar (2)	Eje X	Sin clasificar (2)	Sin clasificar (2)	Sin clasificar (2)
Y	Evento, Estado o Presencia (20)	Eje Y		Relé, Cálculo, Conversión (13,14,18)	
Z	Posición, Dimensión	Eje Z		Motor, Actuador, Elemento final de control sin clasificar	

Tabla 1.7 Código de identificación de instrumentos. ISA-S5.1-84 (R-1992)

Notas explicativas:

(1) Para cubrir las designaciones no normalizadas que pueden emplearse repetidamente en un proyecto se han previsto letras libres. Estas letras pueden tener un significado como primera letra y otro como letra sucesiva. Por ejemplo, la letra *N* puede representar como primera letra el "módulo de elasticidad" y como sucesiva un "osciloscopio".

(2) La letra sin clasificar *X* puede emplearse en las designaciones no indicadas que se utilicen sólo una vez o un número limitado de veces. Se recomienda que su significado figure en el exterior del círculo de identificación del instrumento. Ejemplo: *XR-2* puede ser un registrador de presión y *XX-4* un osciloscopio de tensión.

(3) La forma gramatical de los significados de las letras sucesivas puede modificarse según se requiera. Por ejemplo, "indicar" puede aplicarse como "indicador" o "indicación", "transmitir" como "transmisor" o "transmitiendo", etc.

(4) Cualquier primera letra, utilizada con las letras de modificación *D* (diferencial), *F* (relación), *M* (momentáneo), *K* (variación de tiempo) o *Q* (integración o totalización) o cualquier combinación de las mismas, tiene por objeto representar una nueva variable medida. Por ejemplo, los instrumentos *TDI* y *TI* indican dos variables distintas, la temperatura diferencial y la temperatura.

(5) La letra *A* para análisis abarca todos los análisis no indicados por una letra "libre". Es conveniente definir el tipo de análisis al lado del símbolo.

(6) El empleo de la letra *U* como "multivariable" en lugar de una combinación de primeras letras, es opcional.

(7) El empleo de los términos de modificaciones: "alto", "bajo", "medio" o "intermedio" y "exploración", es opcional.

(8) El término "seguridad" sólo debe aplicarse a elementos primarios y a elementos finales de control que protejan contra condiciones de emergencia (peligrosas para el personal o el equipo). Por este motivo, una válvula autorreguladora de presión que regula la presión de salida de un sistema, mediante el alivio o escape de fluido al exterior, debe ser *PCV*, pero si esta misma válvula se emplea contra condiciones de emergencia, se designa *PSV*.

La designación *PSV* se aplica a todas las válvulas proyectadas para proteger contra condiciones de emergencia de presión sin tener en cuenta si las características de la válvula y la forma de trabajo la colocan en la categoría de válvula de seguridad, válvula de alivio o válvula de seguridad de alivio. Un disco de ruptura se designa *PSE*.

(9) La letra de función pasiva *G* se aplica a los instrumentos que proporcionan una visión directa no calibrada del proceso, por ejemplo, niveles visuales y monitores de televisión.

(10) La letra "indicación" se refiere a la lectura de una medida real analógica o digital de proceso. En el caso de un ajuste manual puede emplearse para la indicación del dial o del ajuste, por ejemplo, el valor de la variable de iniciación.

(11) Una luz piloto que es parte de un bucle de control debe designarse por una primera letra seguida de la letra sucesiva *L*. Por ejemplo, una luz piloto que indica un período de tiempo terminado se designará *KQL*. Si se desea identificar una luz piloto fuera del bucle de control, la luz piloto puede designarse en la misma forma. Por ejemplo, una luz piloto de marcha de un motor eléctrico puede identificarse *EL*, suponiendo que la variable medida adecuada es la tensión, o bien *YL* suponiendo que se vigila el estado de la operación. La letra sin clasificar *X* debe usarse sólo para aplicaciones con límites definidos. La designación *XL* no debe usarse para luces piloto de motores, siendo factible usar las letras, *M*, *N* u *O* para la luz piloto de un motor cuando el significado está previamente definido. Si se usa *M* debe quedar claro que la letra no representa la palabra "motor", sino que pertenece a un estado de monitorización.

(12) El empleo de la letra *U* como "multifunción" en lugar de una combinación de otras letras, es opcional.

(13) Un aparato que conecta, desconecta o transfiere uno o más circuitos, puede ser un interruptor, un relé, un controlador *TODO-NADA* o una válvula de control, dependiendo de la aplicación.

(14) Se supone que las funciones asociadas con el uso de la letra sucesiva *Y* se definirán en el exterior del símbolo del instrumento cuando sea conveniente hacerlo así.

(15) Los términos: "alto", "bajo" y "medio" o "intermedio" deben corresponder a valores de la variable medida, no a los de la señal, a menos que se indique de otro modo. Por ejemplo, una alarma de nivel alto derivada de una señal de un transmisor de nivel de acción inversa debe designarse *LAH*, incluso aunque la alarma sea actuada cuando la señal cae a un valor bajo.

(16) Los términos "alto" y "bajo", cuando se aplican a válvulas, o a otros dispositivos de cierre-apertura, se definen como sigue: "alto" indica que la válvula está o se aproxima a la posición de apertura completa y "bajo" denota que se acerca o está en la posición completamente cerrada.

(17) La palabra "registro" se aplica a cualquier forma de almacenamiento de información que permite su recuperación por otros sistemas.

(18) El término "transmisor" se aplica a un instrumento que capta una señal de proceso a través de un sensor y la transmite de acuerdo con una función predeterminada de la variable de proceso, en una forma de señal de salida de instrumentos (neumática, electrónica o digital), mientras que un convertidor la recibe en una forma de señal de instrumentos y la convierte a otra forma de señal de instrumentos (por ejemplo, recibe 0,2 a 1 bar y la pasa a 4-20 mA c.c.).

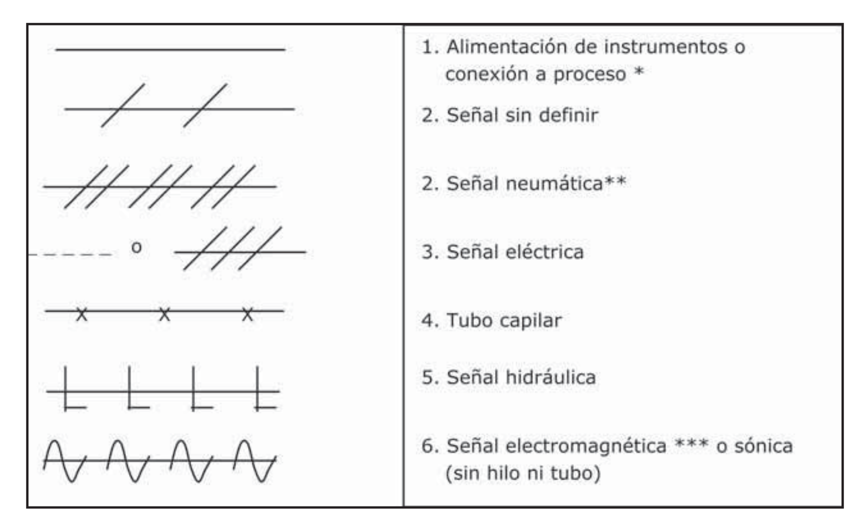
(19) La primera letra *V*, "vibración o análisis mecánico" se reserva para monitorización de maquinaria más que la letra *A* que está reservada para un análisis más general.

(20) La primera letra *Y* se usa para la monitorización de respuestas repuestas ligadas a eventos en lugar de estar ligadas al tiempo o a la programación de tiempo. La letra *Y* también puede significar presencia o estado.

(21) La letra de modificación *K* en combinación con una primera letra tal como *L*, *T*, *W*, significa una variación en el tiempo de la variable medida o iniciadora. Por ejemplo, la variable *WKIC* puede representar un controlador de variación de pérdida de peso.

(22) La letra sucesiva *K* es una opción del usuario (letra libre) para designar una estación de control, mientras que la letra sucesiva *C* se emplea para describir controladores manuales o automáticos.

Los símbolos a emplear en los planos y dibujos de representación de instrumentos:



* Se sugieren las siguientes abreviaturas para representar el tipo de alimentación (o bien de purga de fluidos):

AS Alimentación de aire
IA – Aire de instrumentos
HS Alimentación hidráulica
NS Alimentación de nitrógeno

PA – Aire de planta
ES Alimentación eléctrica
GS Alimentación de gas
SS Alimentación de vapor
WS Alimentación de agua

** El símbolo de señal neumática se aplica también a cualquier señal que emplee gas como medio de transmisión. Si se emplea un gas distinto del aire debe identificarse con una nota al lado del símbolo o bien de otro modo.

*** Los fenómenos electromagnéticos incluyen calor, ondas de radio, radiación nuclear y luz.

	UBICACIÓN PRIMARIA *** ACCESIBLE NORMALMENTE AL OPERADOR	MONTAJE EN CAMPO	UBICACIÓN AUXILIAR *** ACCESIBLE NORMALMENTE AL OPERADOR
INSTRUMENTOS DISCRETOS	1 IP1	2	3
VISUALIZACIÓN COMPARTIDA, CONTROL COMPARTIDO	4	5	6
FUNCIÓN DE ORDENADOR	7	8	9
CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)	10	11	12

13	14 6TE 2584-23 INSTRUMENTO CON CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN LARGO	15 INSTRUMENTOS - COMPARTEN UNA UBICACIÓN COMÚN *
16 LUZ PILOTO	17 C 12 PUNTO 12 MONTADO EN SUBPANEL	18 P ** PURGA O APARATO DE FLUJO
19 R ** POSICIÓN DE REPOSO PARA UN ACTUADOR DE TIPO GATILLO	20 SELLO DE DIAFRAGMA	21 I ** *** LÓGICA DE ENCLAVAMIENTO SIN DEFINIR

Tabla 1.8 *Símbolos generales de funciones o de instrumentos*

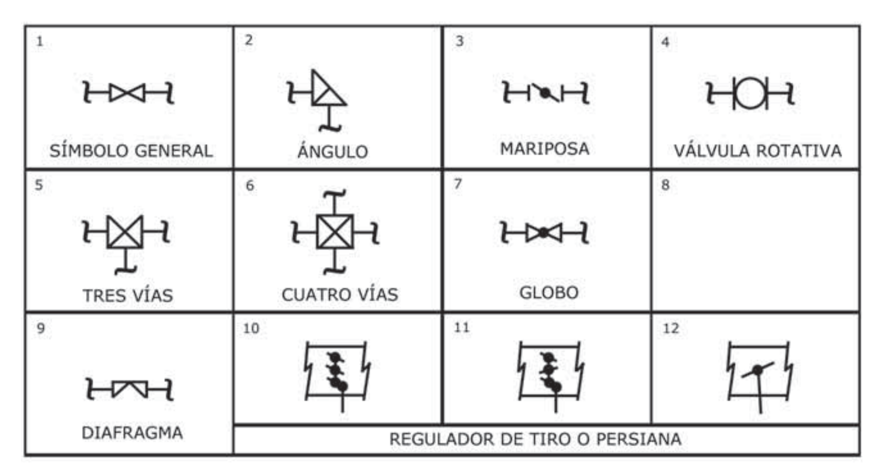


Tabla 1.9 Símbolos de cuerpos de válvulas de control y de persianas

1
CON O SIN POSICIONADOR U OTRO DISPOSITIVO PILOTO (puede ser posicionador, válvula solenoide, convertidor, etc)

2
PREFERIDO PARA DIAFRAGMA MONTADO CON PILOTO. EL CONJUNTO ES ACTUADO POR UNA ENTRADA (MOSTRADA TÍPICAMENTE CON ENTRADA ELÉCTRICA)

DIAFRAGMA DE RESORTE OPUESTO O CON ACTUADOR SIN ESPECIFICAR

3
S
IA
ALTERNATIVA PREFERIDA

4
9
IA
ALTERNATIVA OPCIONAL

DIAFRAGMA DE RESORTE OPUESTO CON POSICIONADOR Y VÁLVULA PILOTO DE SOBRECARRERA QUE PRESURIZA EL DIAFRAGMA CUANDO ACTÚA

5
DIAFRAGMA DE PRESIÓN EQUILIBRADA

6
M
MOTOR ROTATIVO (MOSTRADO TÍPICAMENTE CON SEÑAL ELÉCTRICA QUE PUEDE SER HIDRÁULICA O NEUMÁTICA)

7
D
DIGITAL

8
OPUESTO A RESORTE SIMPLE ACCIÓN

9
DOBLE ACCIÓN

CILINDRO, SIN POSICIONADOR U OTRO PILOTO

10
PREFERIDO PARA CUALQUIER CILINDRO MONTADO CON UN PILOTO, DE MODO QUE EL CONJUNTO ES ACTUADO POR UNA ENTRADA CONTROLADA

Tabla 1.10a Símbolos de actuadores

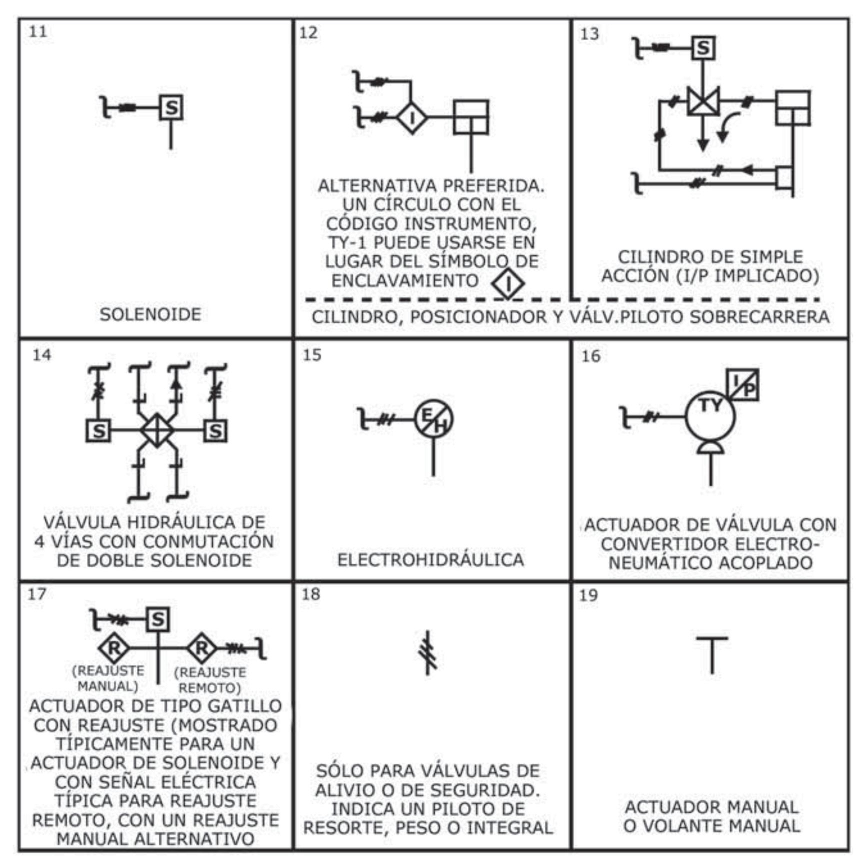


Tabla 1.10b Símbolos de actuadores

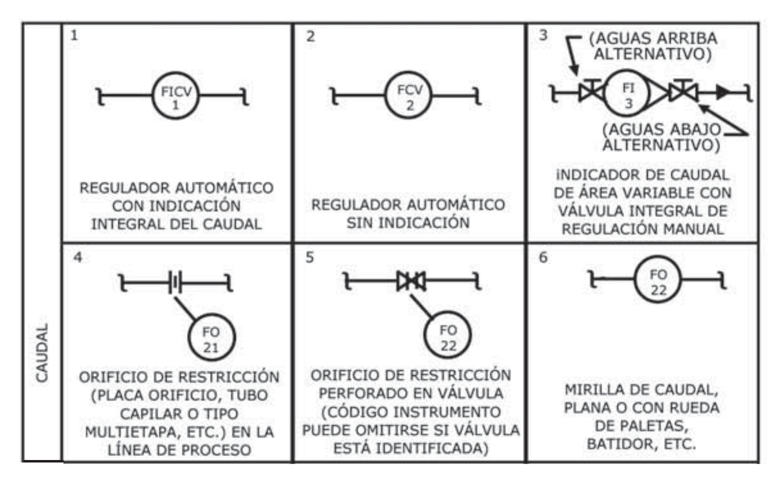


Tabla 1.11a Símbolos de autoreguladores

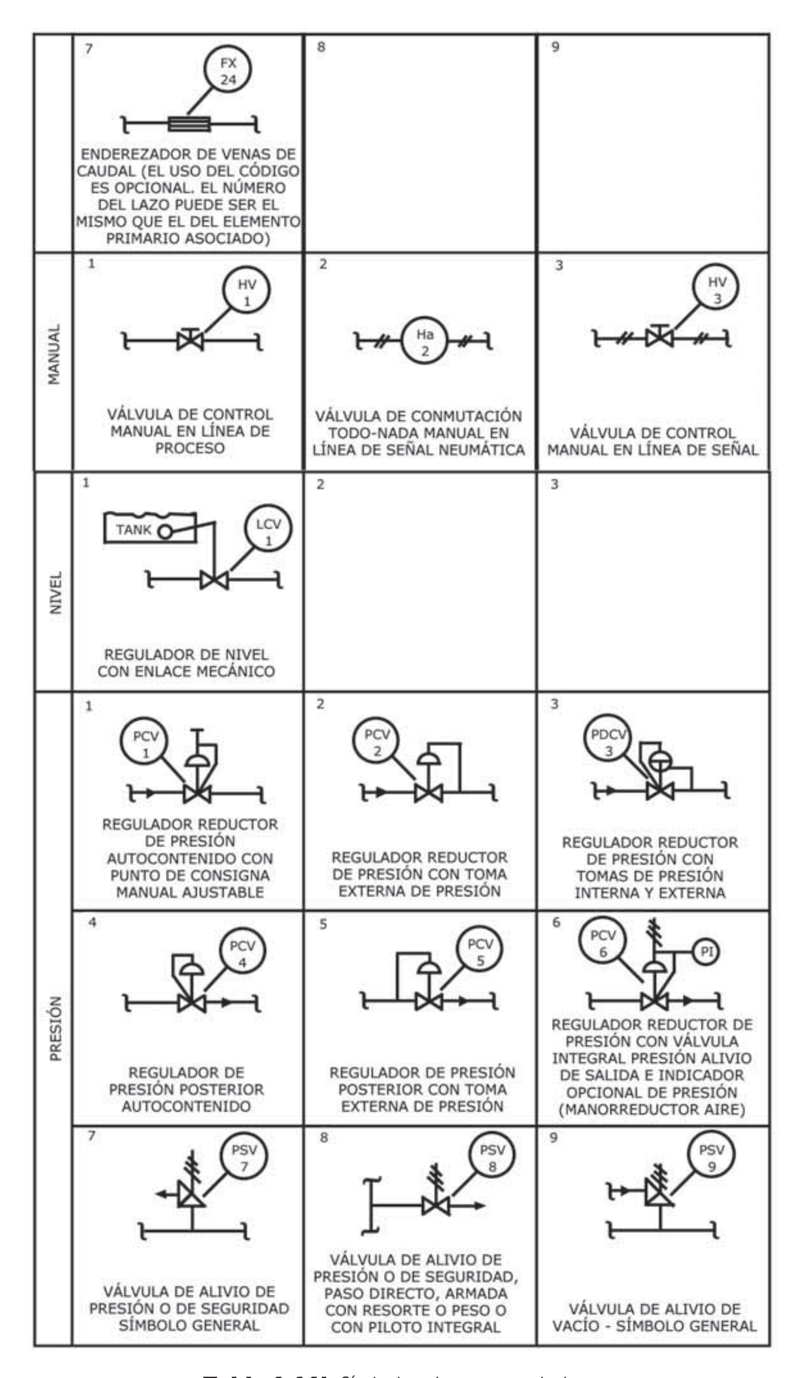


Tabla 1.11b *Símbolos de autoreguladores*

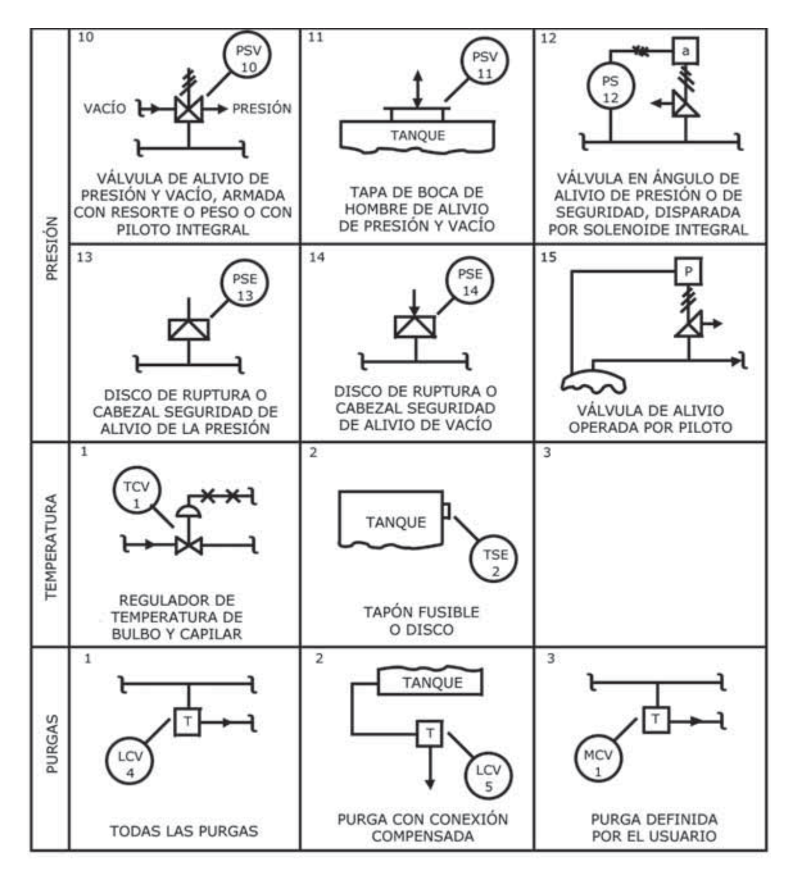


Tabla 1.11c *Símbolos de autoreguladores*

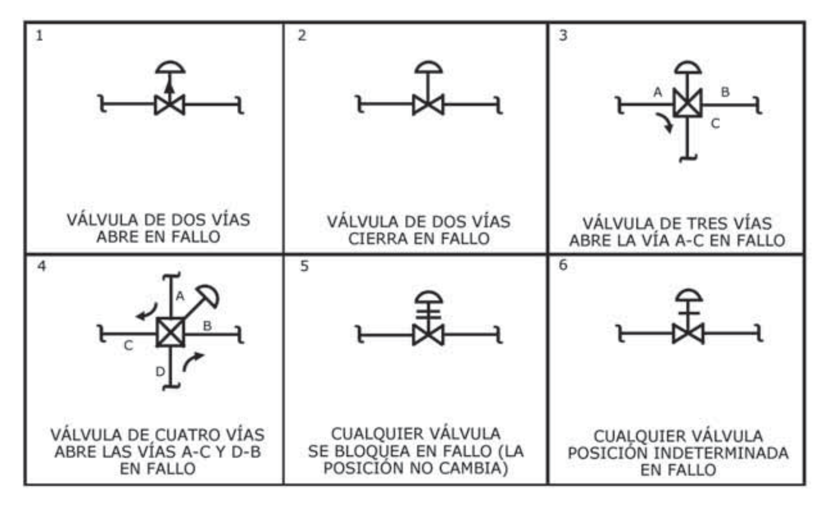


Tabla 1.12 *Símbolos de acción del actuador en caso de fallo en la alimentación (mostrado típicamente para una válvula de control de diafragma)*

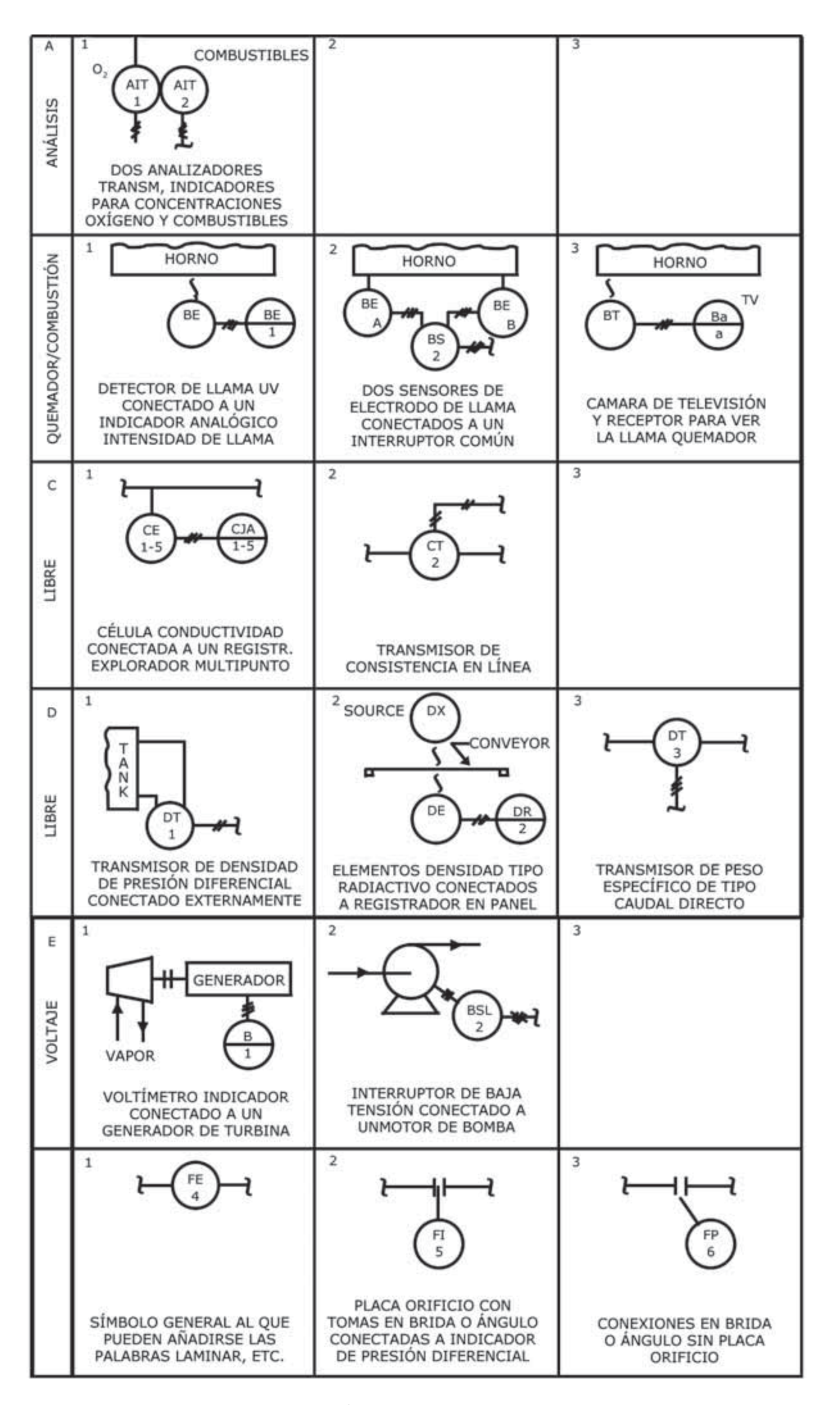


Tabla 1.13a *Símbolos de elementos primarios*

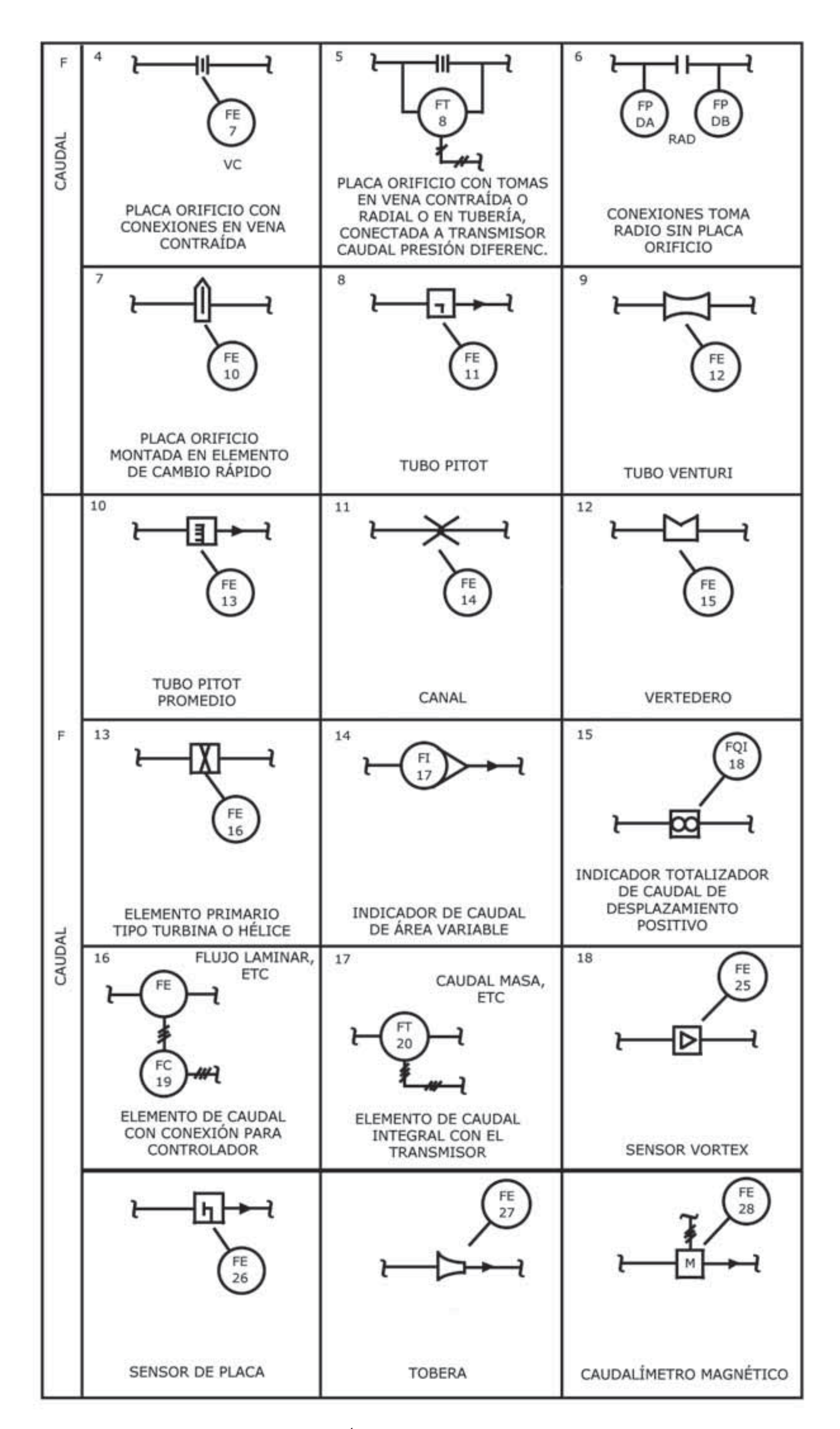


Tabla 1.13b *Símbolos de elementos primarios*

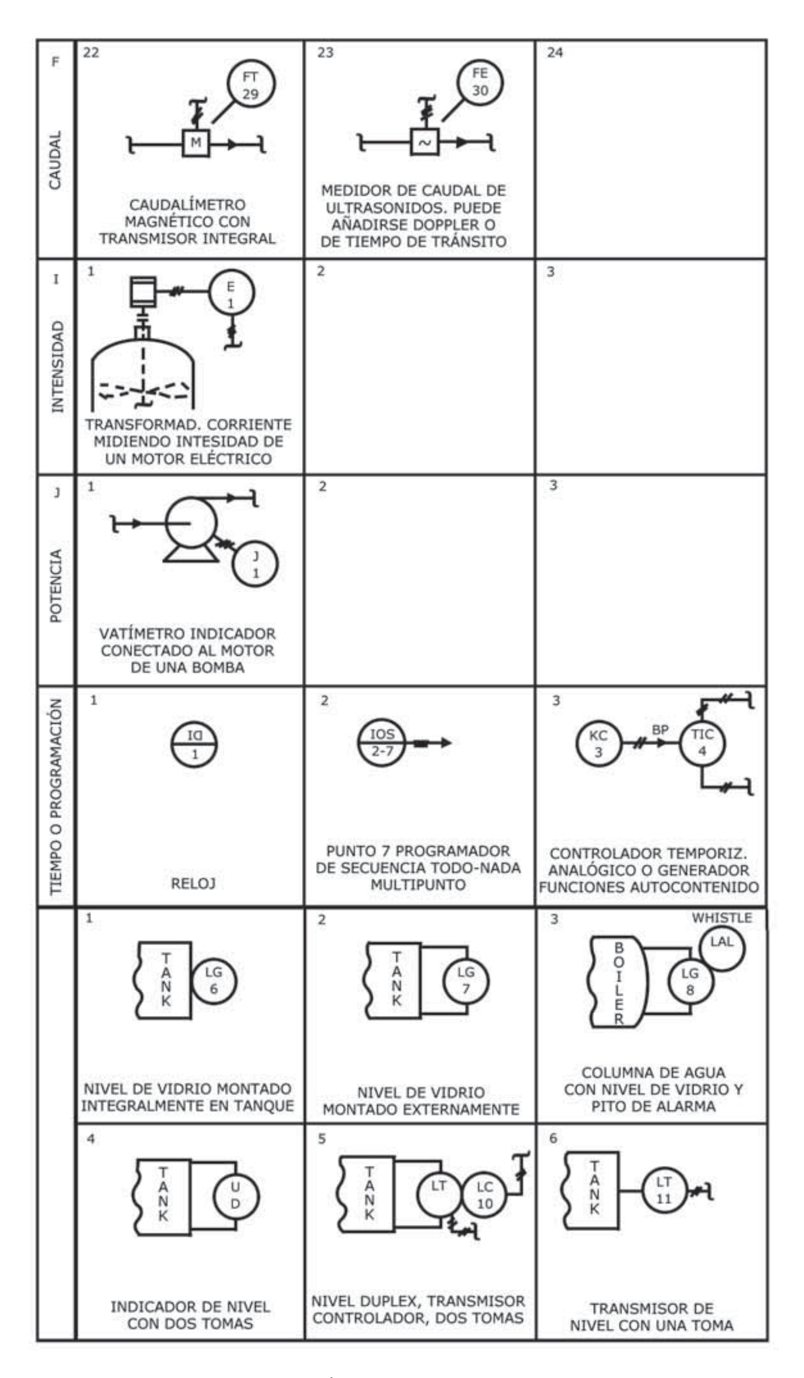


Tabla 1.13c *Símbolos de elementos primarios*

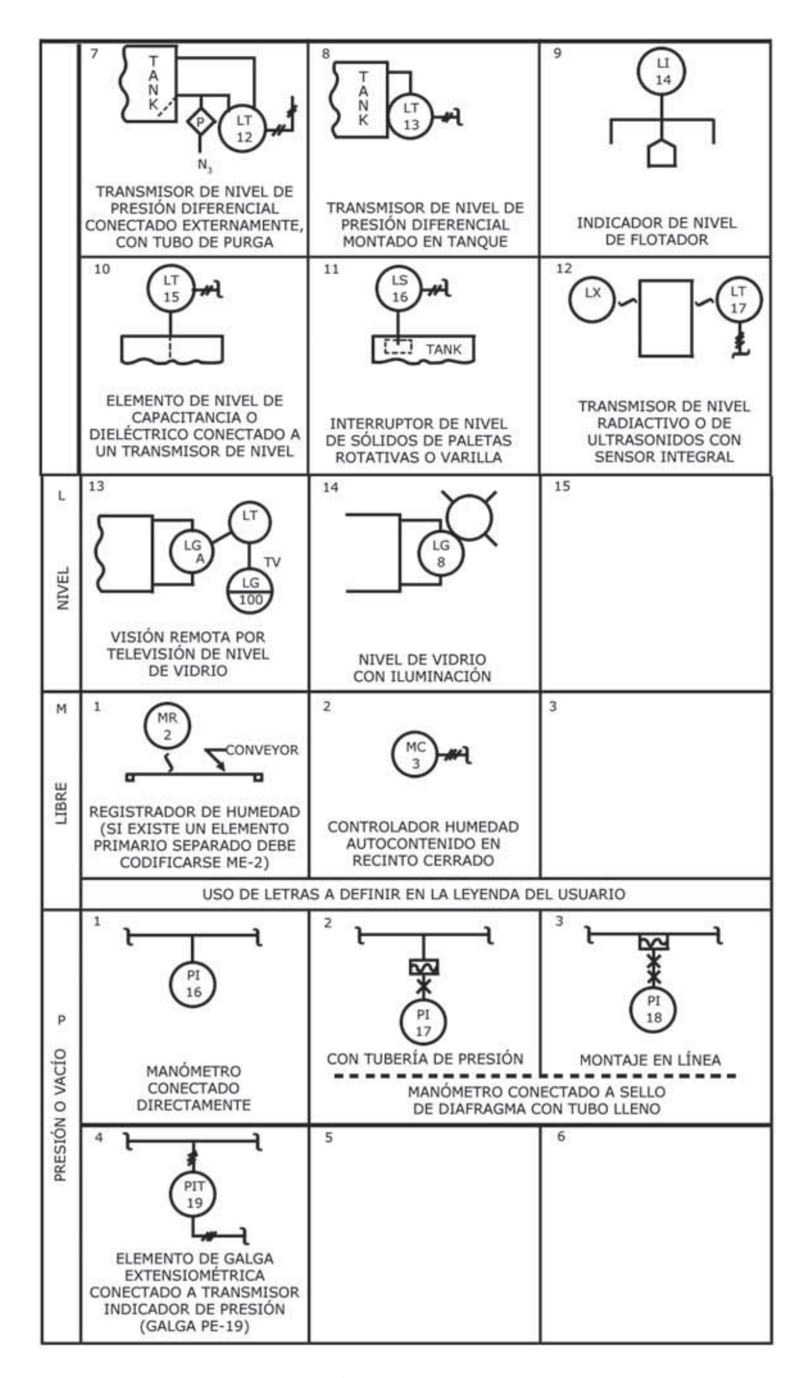


Tabla 1.13d *Símbolos de elementos primarios*

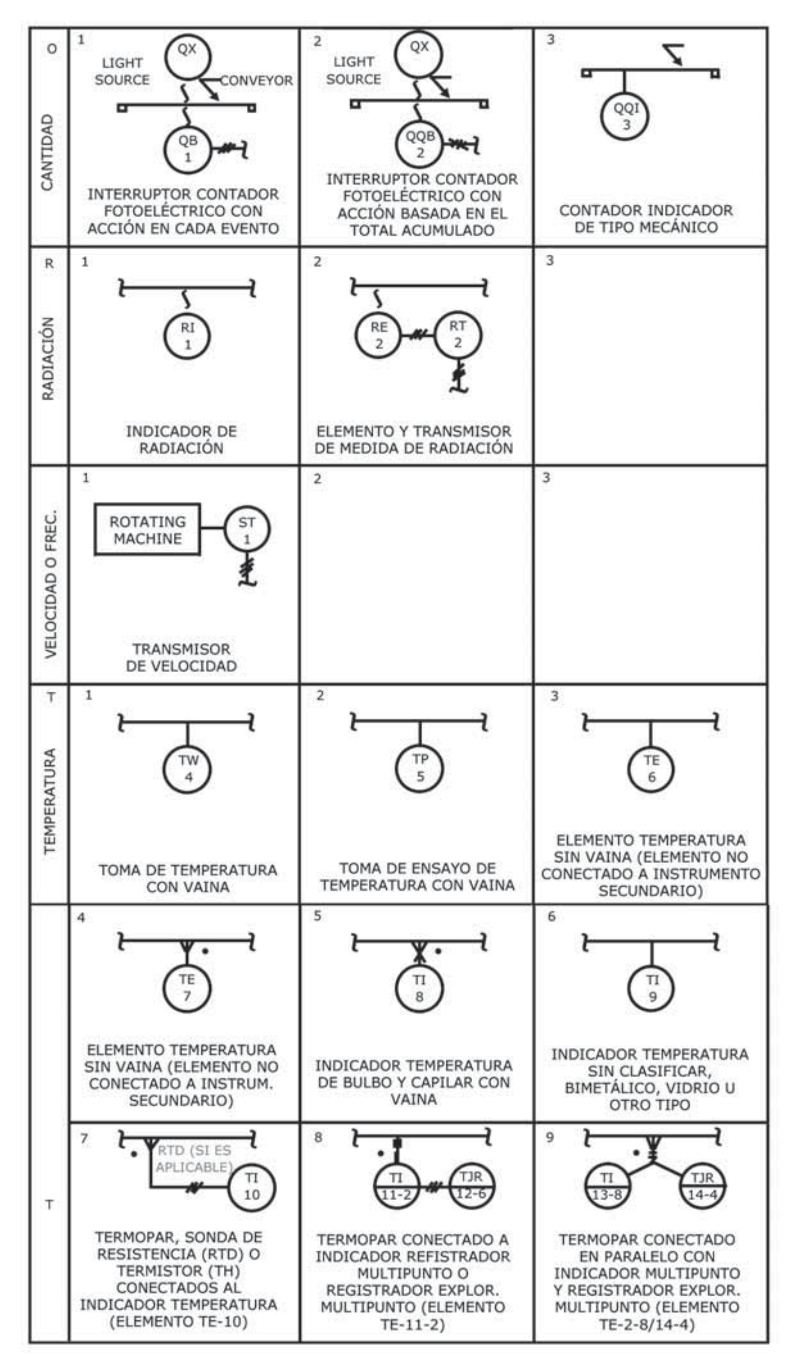


Tabla 1.13e *Símbolos de elementos primarios*

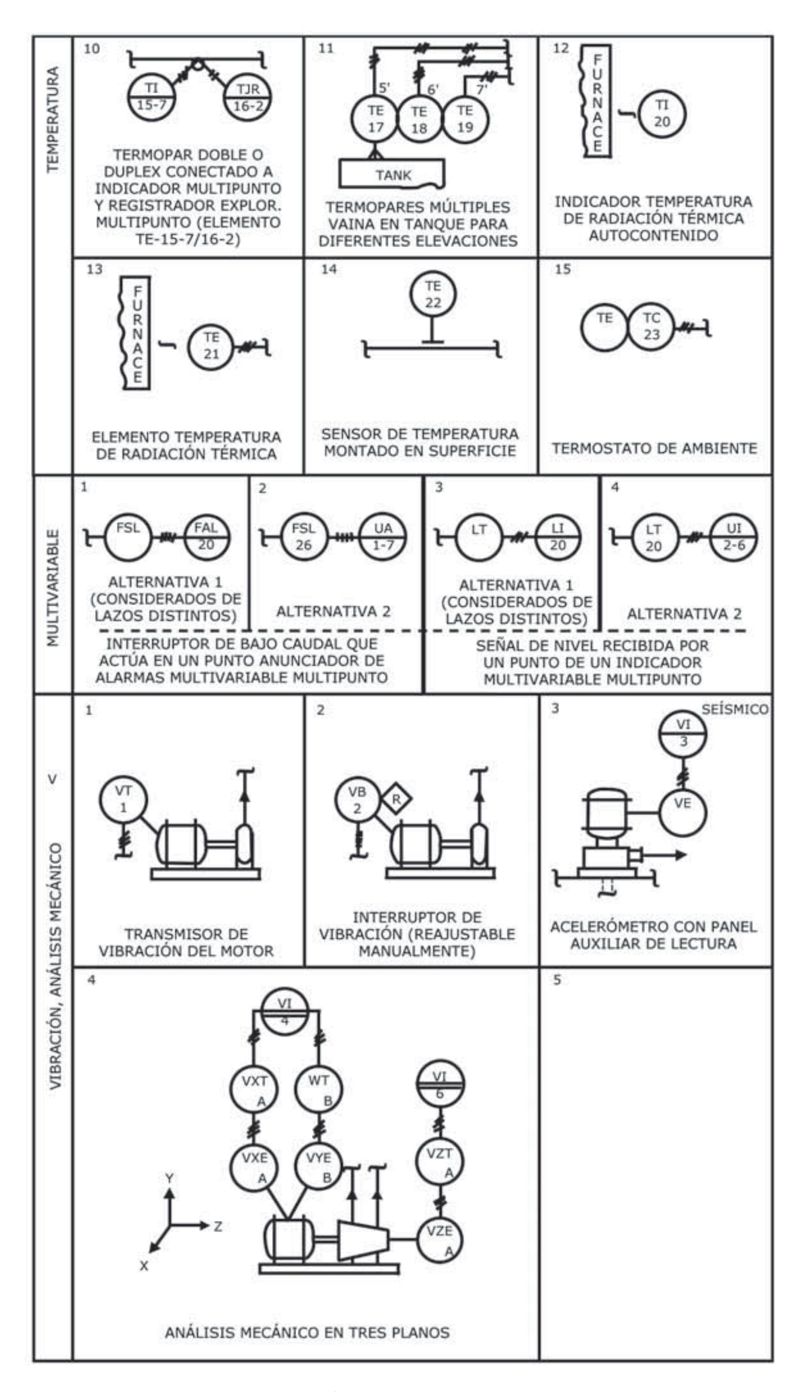


Tabla 1.13f *Símbolos de elementos primarios*

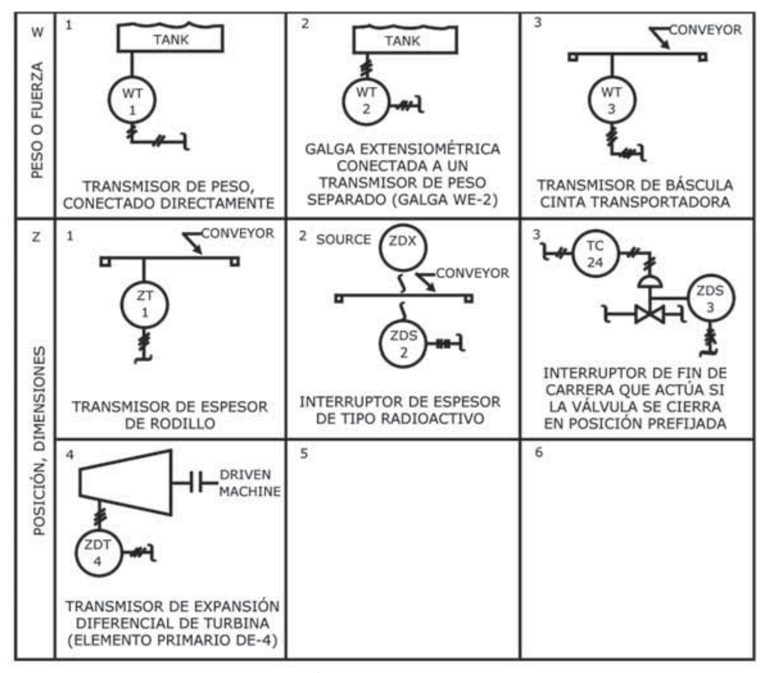


Tabla 1.13g *Símbolos de elementos primarios*

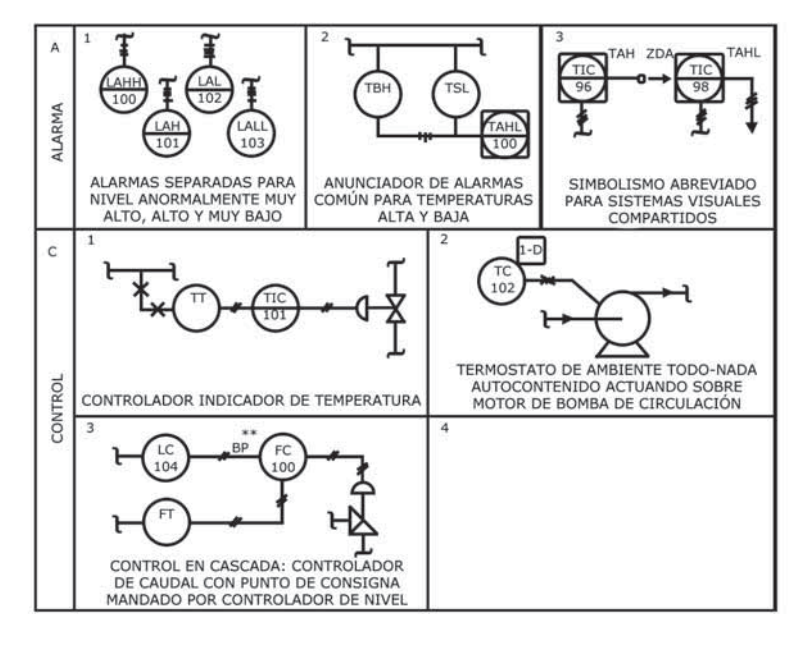


Tabla 1.14a *Ejemplos de funciones*

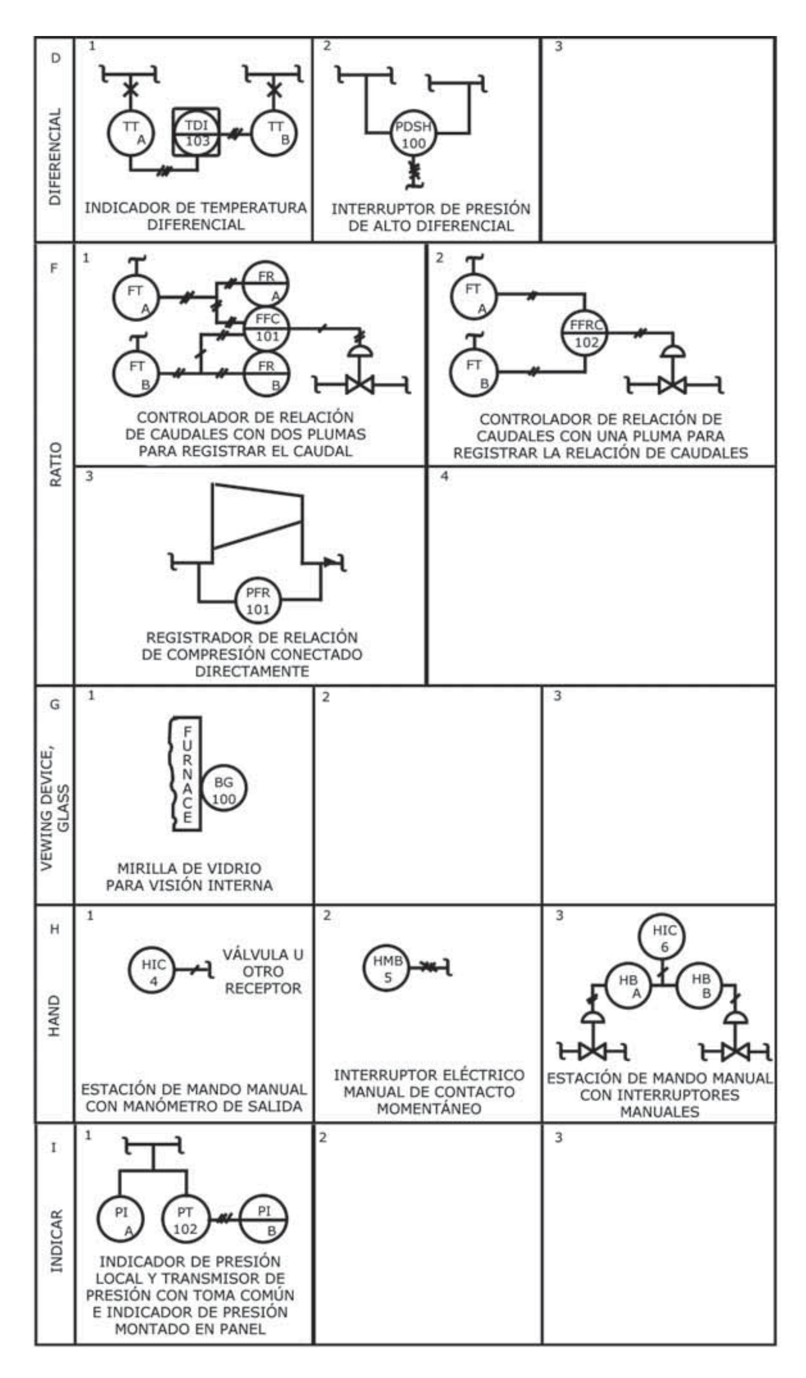


Tabla 1.14b Ejemplos de funciones

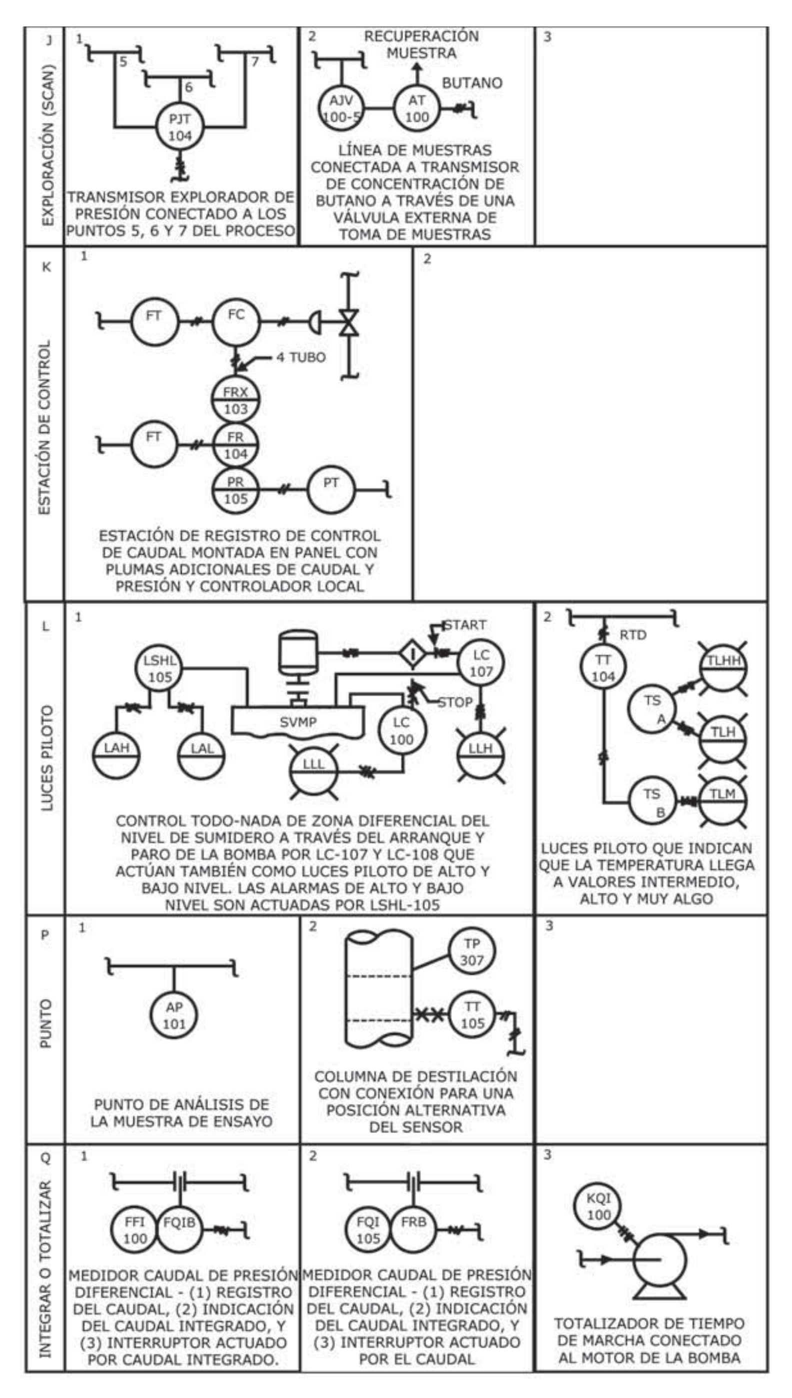


Tabla 1.14c *Ejemplos de funciones*

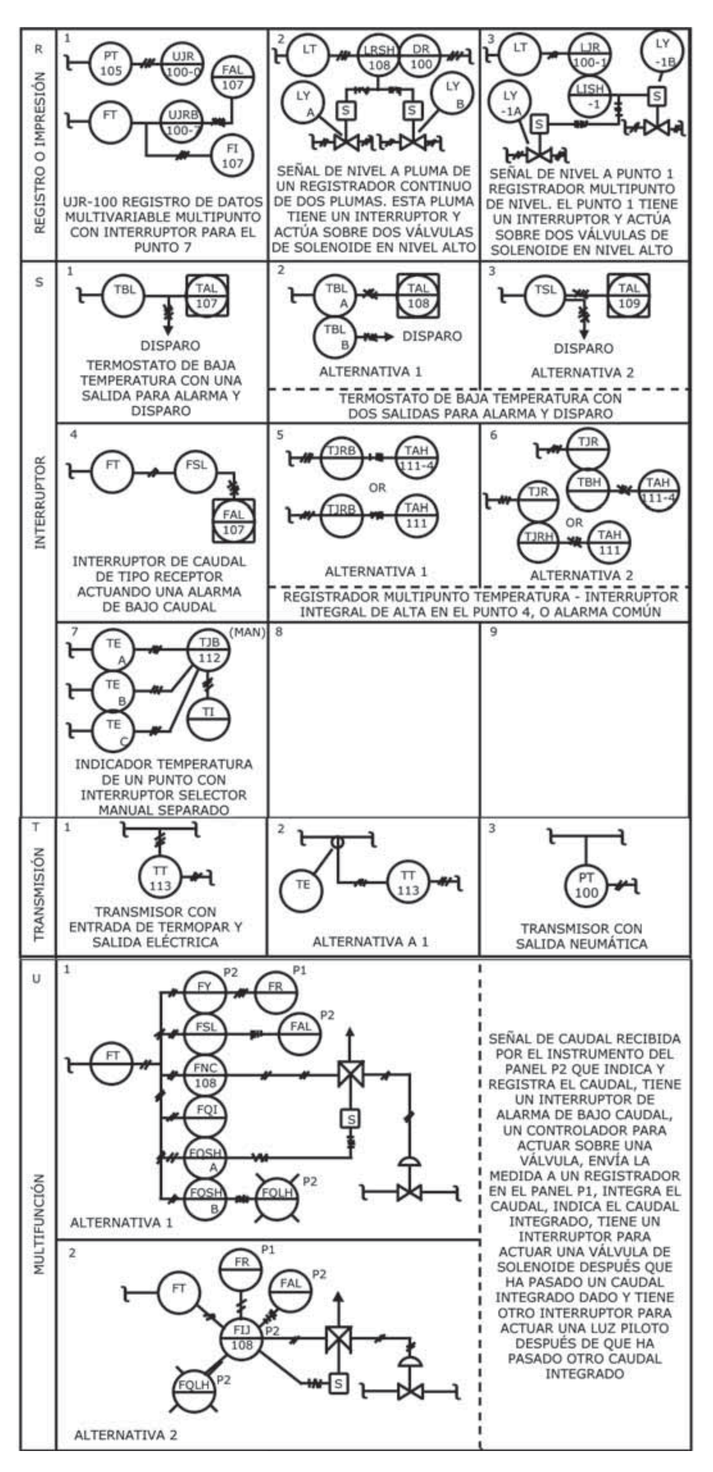


Tabla 1.14d Ejemplos de funciones

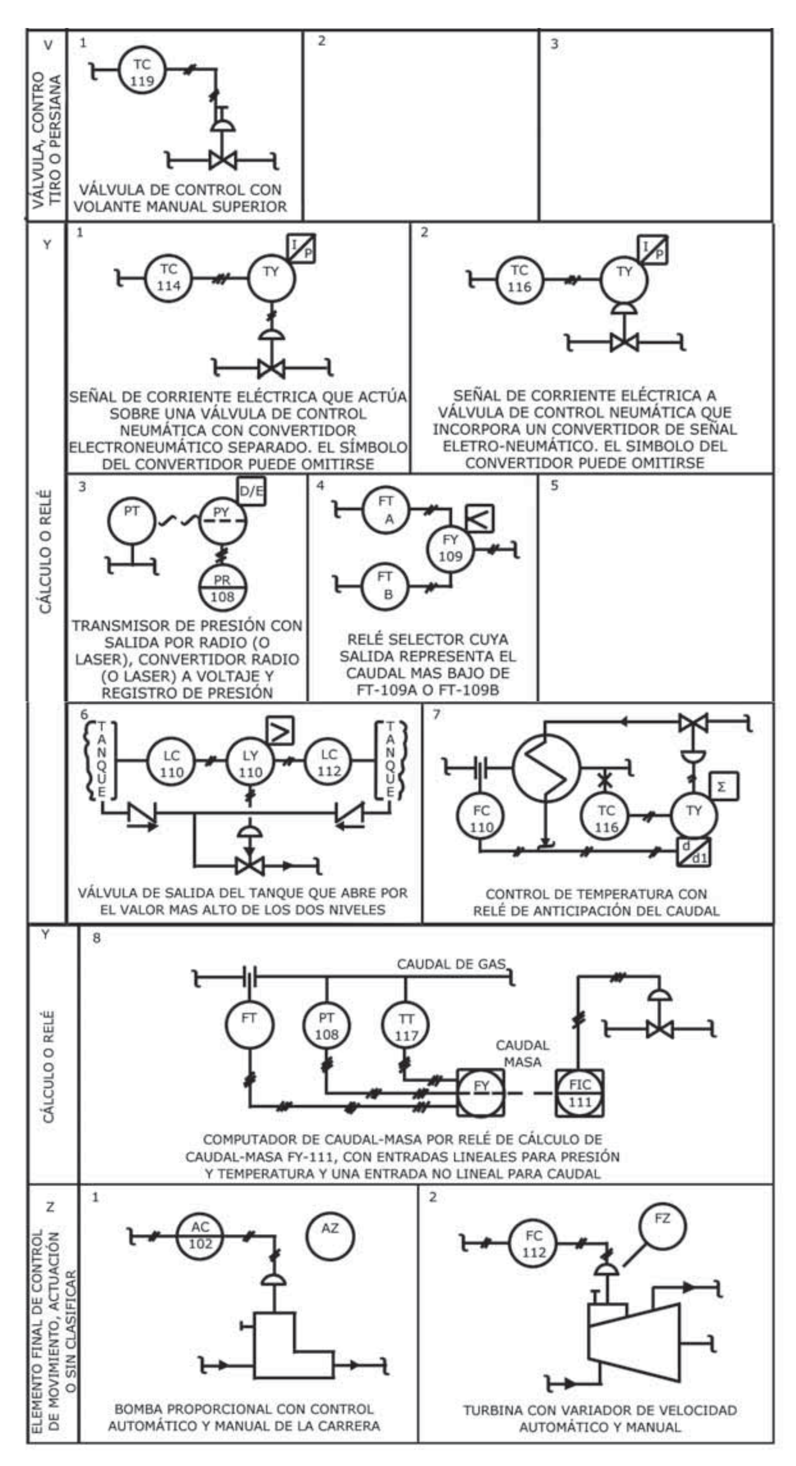


Tabla 1.14e *Ejemplos de funciones*

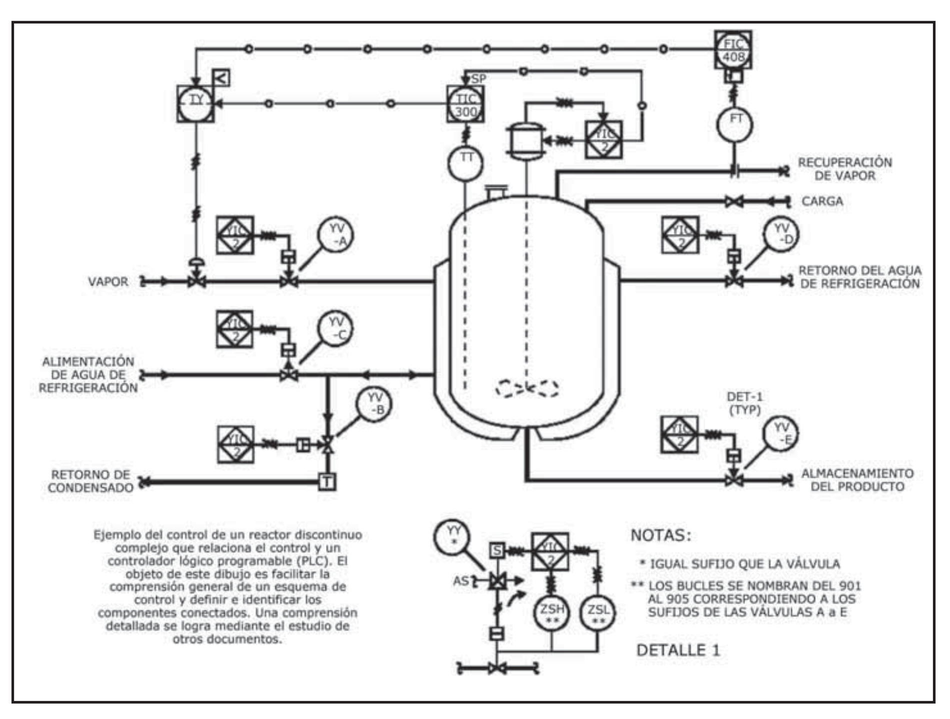
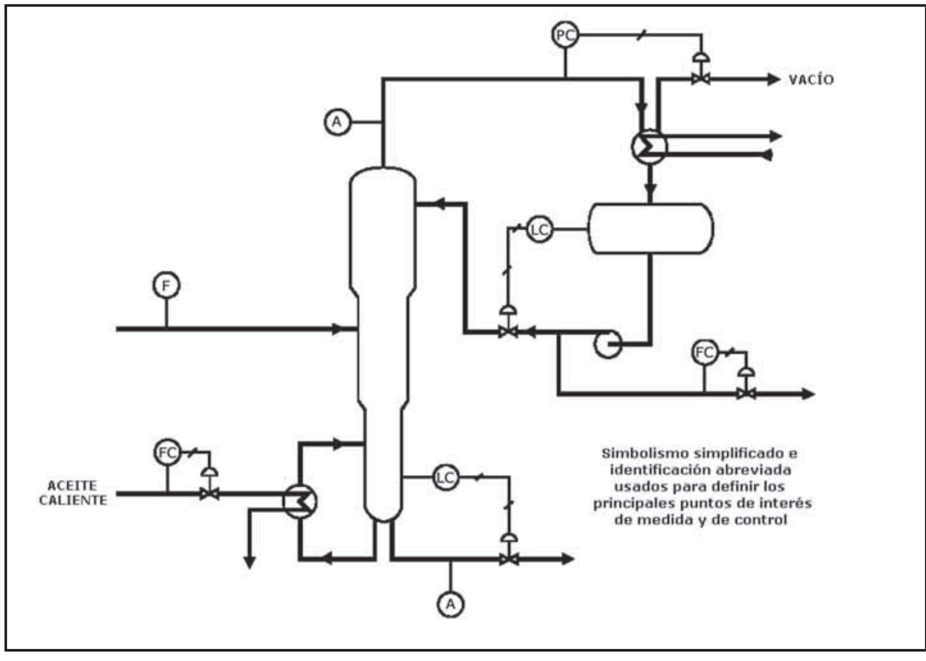
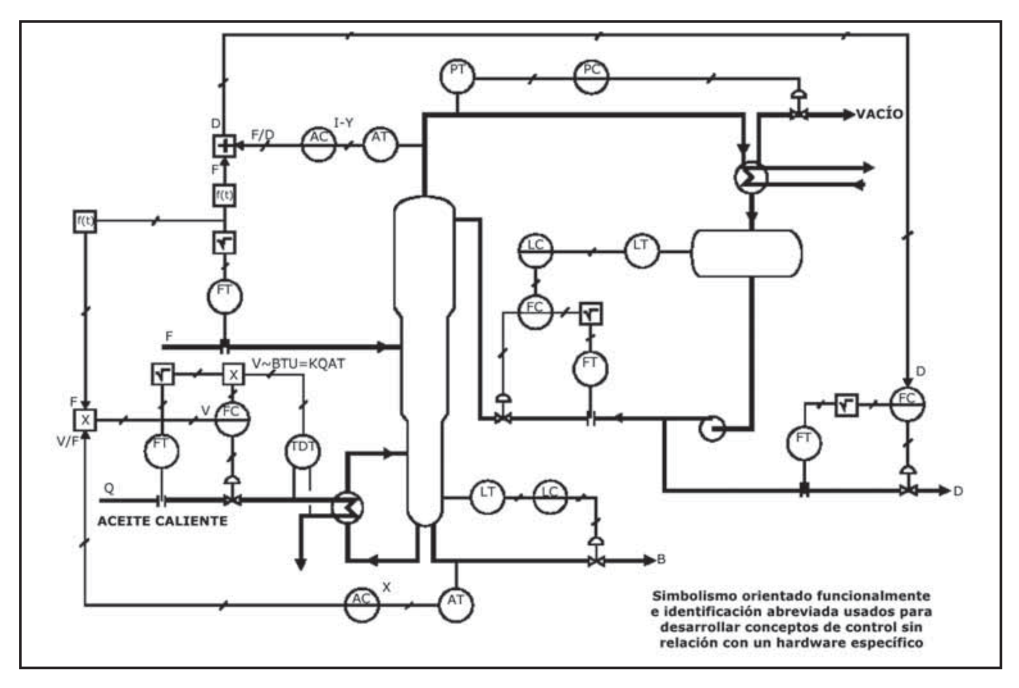


Tabla 1.15 Ejemplo de combinaciones complejas



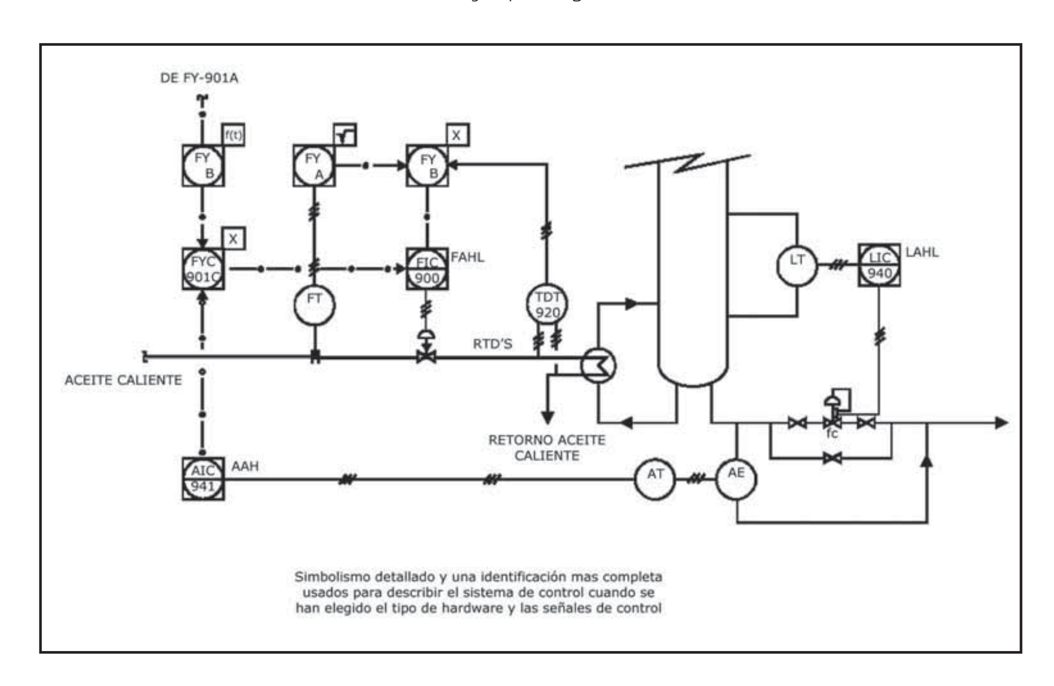
1. SIMBOLISMO TÍPICO PARA DIAGRAMAS SIMPLIFICADOS

Tabla 1.16 Ejemplo de grado de detalle



2. SIMBOLISMO TÍPICO PARA DIAGRAMAS CONCEPTUALES

Tabla 1.16 Ejemplo de grado de detalle



3. SIMBOLISMO TÍPICO PARA DIAGRAMAS DETALLADOS

Tabla 1.16 Ejemplo de grado de detalle

1.3.3.2 Resumen norma ISA-S5.2-76 (R-1992)

Esta norma lista los símbolos lógicos que representan operaciones con enclavamientos binarios y sistemas secuenciales para el arranque, operación, alarma y paro de procesos y equipos en la industria química, petroquímica, centrales de potencia, aire acondicionado y en otras numerosas industrias. Las operaciones binarias pueden ser realizadas por cualquier clase de hardware, ya sea eléctrico, electrónico, fluidico, neumático, hidráulico, mecánico, manual, óptico u otros.

La existencia de una señal lógica puede corresponder físicamente a la existencia o no de una señal de instrumentos, dependiendo del tipo particular del sistema de hardware y de la filosofía del diseño del circuito. Por ejemplo, el proyectista puede diseñar una alarma de alto caudal para que sea accionada por un interruptor eléctrico en el que los contactos abran, o bien cierren, cuando el caudal es alto. Por lo tanto, la condición de caudal alto puede ser representada físicamente por la ausencia o por la presencia de una señal eléctrica.

El flujo de información está representado por líneas que interconectan estados lógicos. La dirección normal del flujo es de izquierda a derecha o de arriba a abajo. Para mayor claridad del diagrama, y siempre que sea necesario, pueden añadirse flechas a las líneas de flujo.

Es posible que una condición lógica específica no sea comprendida cuando trate a un aparato con dos estados alternativos específicos. Por ejemplo, si una válvula no está cerrada, puede ser debido a que la válvula está totalmente abierta, o bien a que la válvula no está cerrada y está en una posición intermedia entre casi cerrada y totalmente abierta. La interpretación literal del diagrama indica que la segunda posibilidad es la correcta.

En las válvulas todo-nada el diagrama debe especificar exactamente lo proyectado. De este modo, si la válvula debe estar abierta, así debe establecerse; no debe indicarse que la válvula está no cerrada.

En contraste, un dispositivo tal como una bomba accionada por un motor, siempre está funcionando o parada salvo algunas situaciones especiales. El señalar que una bomba no está en funcionamiento significa que está parada.

Las siguientes definiciones se aplican a los aparatos que tienen posiciones abiertas, cerradas o intermedias:

- Posición abierta: posición que está 100% abierta.
- Posición no abierta: posición que es menor de 100% abierta.
- Posición cerrada: posición que es 0% abierta.
- Posición no cerrada: una posición que es mayor que 0% abierta.
- Posición intermedia: una posición especificada que es mayor de 0% y menor de 100% abierta.
- Posición no intermedia: una posición especificada que es superior o inferior a la posición intermedia especificada.

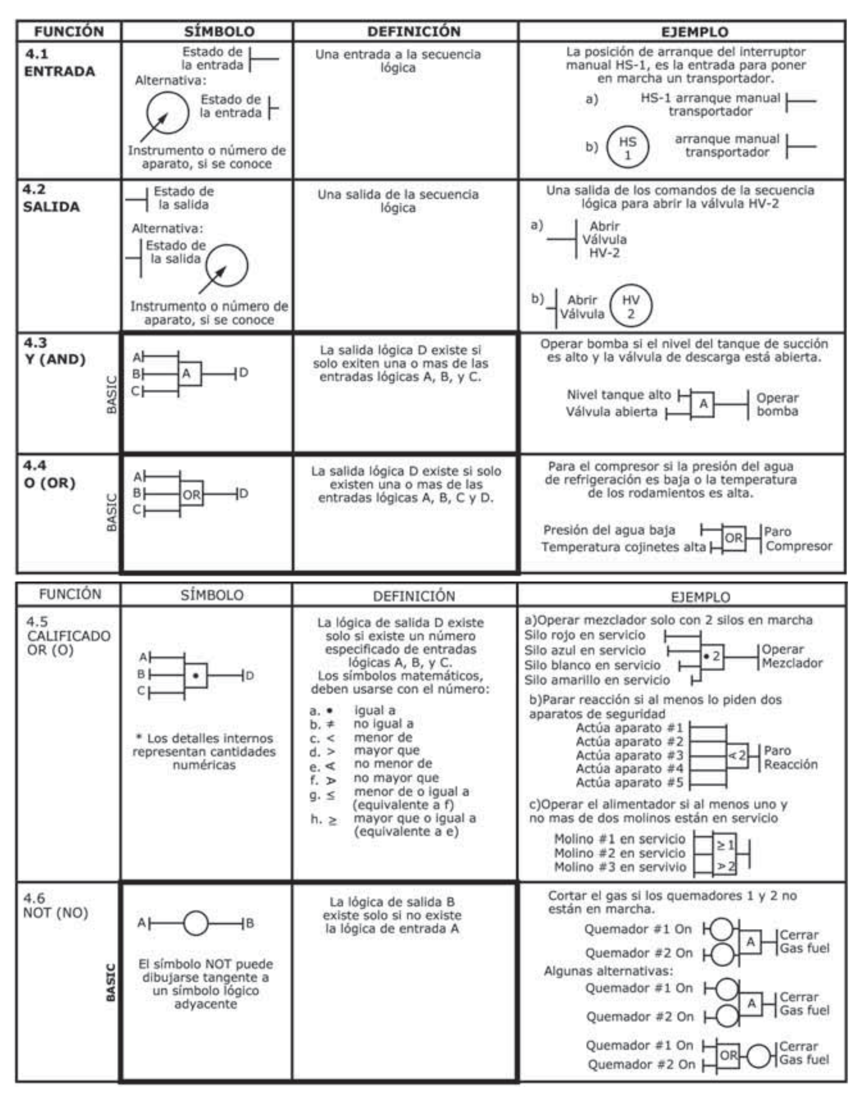
En un sistema lógico que tenga un estado de entrada derivado de modo inferencial o indirecto, puede presentarse una condición que conduzca a una conclusión errónea. Por ejemplo, la suposición de que existe caudal si una bomba está funcionando puede ser falsa porque una válvula puede estar cerrada, o porque el eje de la bomba esté roto o por otra causa.

La pérdida de alimentación –eléctrica, neumática u otra– a memorias o a otros elementos lógicos puede afectar la operación del proceso, por lo que la fuente de alimentación o su pérdida debe introducirse como entrada lógica al sistema o a los elementos lógicos individuales. En las memorias,

la fuente de alimentación puede introducirse como una entrada lógica o en la forma indicada en los diagramas de "memoria *flip-flop*". También puede ser necesario mostrar el efecto de la restauración de la alimentación.

Definiciones

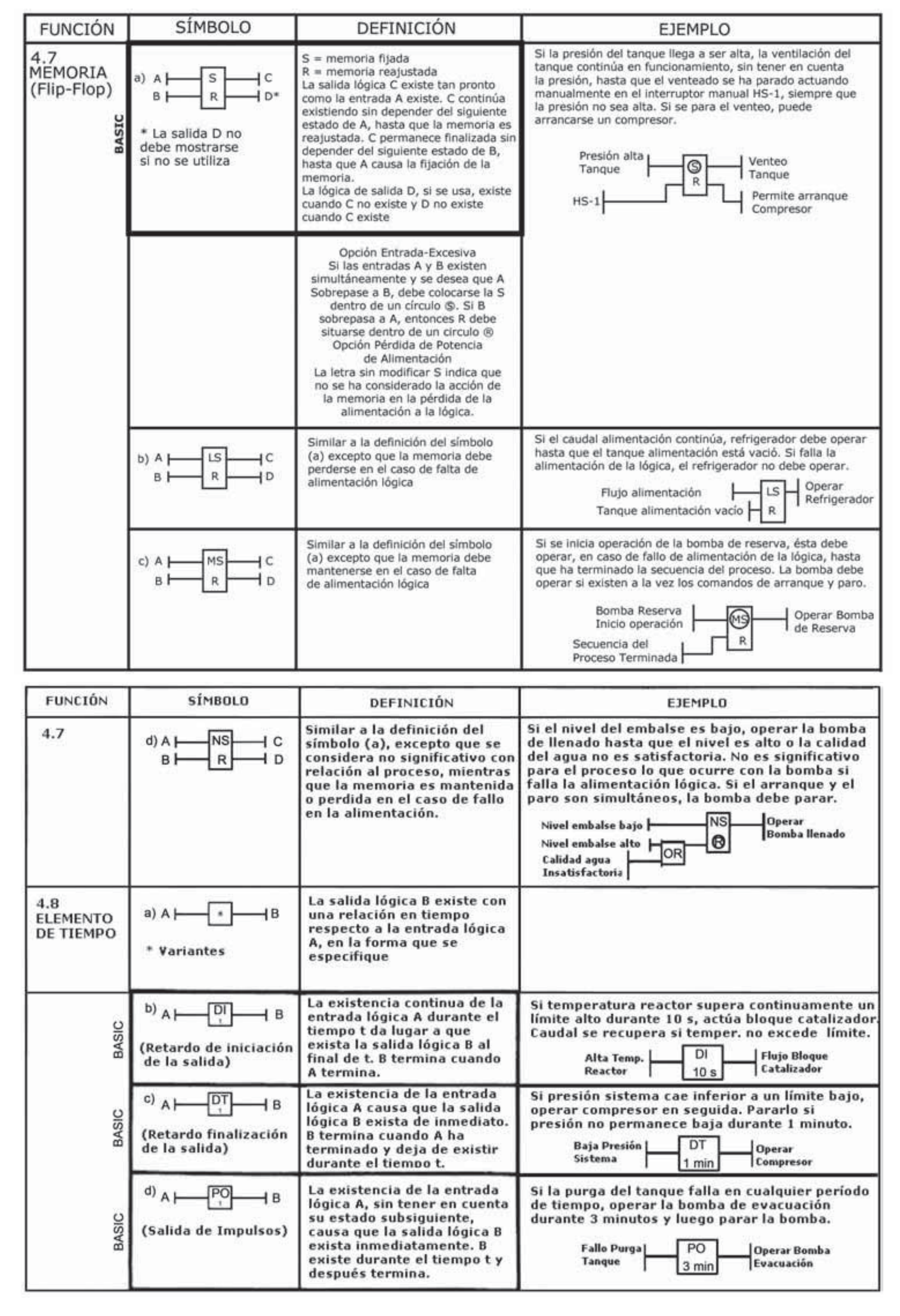
En la tabla 1.17 que aparece en las páginas siguientes se representan y definen los símbolos lógicos; los símbolos con tres entradas A, B y C son típicos de funciones lógicas con cualquier número de dos o más entradas. En las tablas de verdad, 0 indica la no existencia de la entrada lógica o de la señal de salida o el estado dado en la cabecera de la columna. 1 indica la existencia de la señal o estado de entrada lógica. D indica la existencia de la señal o estado de salida lógica como resultado de las entradas lógicas apropiadas.



FUNCIÓN	SÍMBOLO	DEFINICIÓN	EJEMPLO
4.1 ENTRADA	Estado de la entrada. Alternativa: Estado de la entrada. Instrumento o número de aparato, si se conoce	Una entrada a la secuencia lógica	La posición de arranque del interruptor manual HS-1, es la entrada para poner en marcha un transportador. a) HS-1 arranque manual transportador. b) HS 1 arranque manual transportador
4.2 SALIDA	Estado de la salida. Alternativa: Estado de la salida. Instrumento o número de aparato, si se conoce	Una salida de la secuencia lógica	Una salida de los comandos de la secuencia lógica para abrir la válvula HV-2. a) Abrir Válvula HV-2. b) Abrir Válvula HV 2
4.3 Y (AND)	BASIC. A, B, C – A – D	La salida lógica D existe si solo exiten una o mas de las entradas lógicas A, B, y C.	Operar bomba si el nivel del tanque de succión es alto y la válvula de descarga está abierta. Nivel tanque alto, Válvula abierta – A – Operar bomba
4.4 O (OR)	BASIC. A, B, C – OR – D	La salida lógica D existe si solo existen una o mas de las entradas lógicas A, B, C y D.	Para el compresor si la presión del agua de refrigeración es baja o la temperatura de los rodamientos es alta. Presión del agua baja, Temperatura cojinetes alta – OR – Paro Compresor

FUNCIÓN	SÍMBOLO	DEFINICIÓN	EJEMPLO
4.5 CALIFICADO OR (O)	A, B, C – • – D. * Los detalles internos representan cantidades numéricas	La lógica de salida D existe solo si existe un número especificado de entradas lógicas A, B, y C. Los símbolos matemáticos, deben usarse con el número: a. • igual a; b. ≠ no igual a; c. < menor de; d. > mayor que; e. ≮ no menor de; f. ≯ no mayor que; g. ≤ menor de o igual a (equivalente a f); h. ≥ mayor que o igual a (equivalente a e)	a)Operar mezclador solo con 2 silos en marcha: Silo rojo en servicio, Silo azul en servicio, Silo blanco en servicio, Silo amarillo en servicio – •2 – Operar Mezclador. b)Parar reacción si al menos lo piden dos aparatos de seguridad: Actúa aparato #1, Actúa aparato #2, Actúa aparato #3, Actúa aparato #4, Actúa aparato #5 – <2 – Paro Reacción. c)Operar el alimentador si al menos uno y no mas de dos molinos están en servicio: Molino #1 en servicio, Molino #2 en servicio, Molino #3 en servivio – ≥1, >2
4.6 NOT (NO)	BASIC. A –O– B. El símbolo NOT puede dibujarse tangente a un símbolo lógico adyacente	La lógica de salida B existe solo si no existe la lógica de entrada A	Cortar el gas si los quemadores 1 y 2 no están en marcha. Quemador #1 On, Quemador #2 On – A – Cerrar Gas fuel. Algunas alternativas: Quemador #1 On, Quemador #2 On – A – Cerrar Gas fuel; Quemador #1 On, Quemador #2 On – OR –O– Cerrar Gas fuel

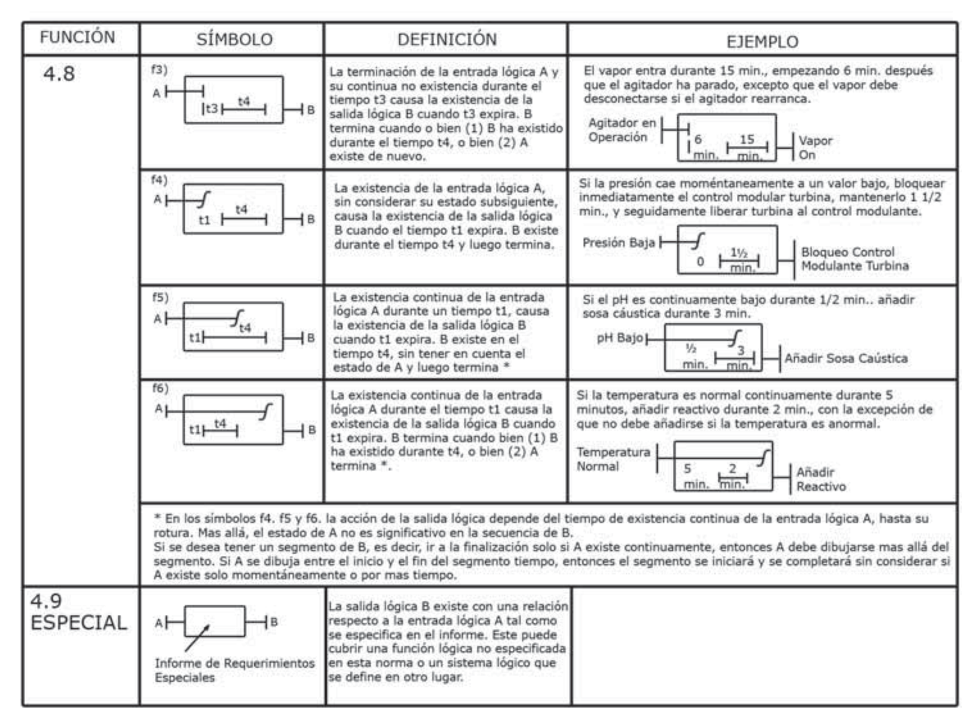
Tabla 1.17a *Símbolos lógicos*



FUNCIÓN	SÍMBOLO	DEFINICIÓN	EJEMPLO
4.7 MEMORIA (Flip-Flop) BASIC	a) A, B → S, R → C, D* * La salida D no debe mostrarse si no se utiliza	S = memoria fijada R = memoria reajustada La salida lógica C existe tan pronto como la entrada A existe. C continúa existiendo sin depender del siguiente estado de A, hasta que la memoria es reajustada. C permanece finalizada sin depender del siguiente estado de B, hasta que A causa la fijación de la memoria. La lógica de salida D, si se usa, existe cuando C no existe y D no existe cuando C existe	Si la presión del tanque llega a ser alta, la ventilación del tanque continúa en funcionamiento, sin tener en cuenta la presión, hasta que el venteado se ha parado actuando manualmente en el interruptor manual HS-1, siempre que la presión no sea alta. Si se para el venteo, puede arrancarse un compresor. Presión alta Tanque; HS-1; Ⓢ R; Venteo Tanque; Permite arranque Compresor
		Opción Entrada-Excesiva Si las entradas A y B existen simultáneamente y se desea que A Sobrepase a B, debe colocarse la S dentro de un círculo Ⓢ. Si B sobrepasa a A, entonces R debe situarse dentro de un circulo ® Opción Pérdida de Potencia de Alimentación La letra sin modificar S indica que no se ha considerado la acción de la memoria en la pérdida de la alimentación a la lógica.	
	b) A, B → LS, R → C, D	Similar a la definición del símbolo (a) excepto que la memoria debe perderse en el caso de falta de alimentación lógica	Si el caudal alimentación continúa, refrigerador debe operar hasta que el tanque alimentación está vació. Si falla la alimentación de la lógica, el refrigerador no debe operar. Flujo alimentación; Tanque alimentación vacío; LS R; Operar Refrigerador
	c) A, B → MS, R → C, D	Similar a la definición del símbolo (a) excepto que la memoria debe mantenerse en el caso de falta de alimentación lógica	Si se inicia operación de la bomba de reserva, ésta debe operar, en caso de fallo de alimentación de la lógica, hasta que ha terminado la secuencia del proceso. La bomba debe operar si existen a la vez los comandos de arranque y paro. Bomba Reserva Inicio operación; Secuencia del Proceso Terminada; MS R; Operar Bomba de Reserva
4.7	d) A, B → NS, R → C, D	Similar a la definición del símbolo (a), excepto que se considera no significativo con relación al proceso, mientras que la memoria es mantenida o perdida en el caso de fallo en la alimentación.	Si el nivel del embalse es bajo, operar la bomba de llenado hasta que el nivel es alto o la calidad del agua no es satisfactoria. No es significativo para el proceso lo que ocurre con la bomba si falla la alimentación lógica. Si el arranque y el paro son simultáneos, la bomba debe parar. Nivel embalse bajo; Nivel embalse alto; Calidad agua Insatisfactoria; OR; NS ®; Operar Bomba llenado
4.8 ELEMENTO DE TIEMPO	a) A → * → B * Variantes	La salida lógica B existe con una relación en tiempo respecto a la entrada lógica A, en la forma que se especifique	
BASIC	b) A → DI t → B (Retardo de iniciación de la salida)	La existencia continua de la entrada lógica A durante el tiempo t da lugar a que exista la salida lógica B al final de t. B termina cuando A termina.	Si temperatura reactor supera continuamente un límite alto durante 10 s, actúa bloque catalizador. Caudal se recupera si temper. no excede límite. Alta Temp. Reactor; DI 10 s; Flujo Bloque Catalizador
BASIC	c) A → DT t → B (Retardo finalización de la salida)	La existencia de la entrada lógica A causa que la salida lógica B exista de inmediato. B termina cuando A ha terminado y deja de existir durante el tiempo t.	Si presión sistema cae inferior a un límite bajo, operar compresor en seguida. Pararlo si presión no permanece baja durante 1 minuto. Baja Presión Sistema; DT 1 min; Operar Compresor
BASIC	d) A → PO t → B (Salida de Impulsos)	La existencia de la entrada lógica A, sin tener en cuenta su estado subsiguiente, causa que la salida lógica B exista inmediatamente. B existe durante el tiempo t y después termina.	Si la purga del tanque falla en cualquier período de tiempo, operar la bomba de evacuación durante 3 minutos y luego parar la bomba. Fallo Purga Tanque; PO 3 min; Operar Bomba Evacuación

Tabla 1.17b *Símbolos lógicos*

FUNCIÓN	SÍMBOLO	DEFINICIÓN	EJEMPLO
4.8	Un método generalizado para el diagrama de las funciones del tiempo. Los símbolos definidos son ilustrativos.		
	e1) A B	Existe la entrada del estado lógico No existe la entrada del estado lógico Existe la salida del estado lógico No existe la salida del estado lógico El tiempo de iniciación de la entrada lógica A se representa por el borde izquierdo de la caja. El paso del tiempo transcurre de izquierda a derecha y se muestra generalmente sin escala. La salida lógica B siempre empieza y termina en el mismo estado, dentro de la caja del elemento tiempo. Puede mostrarse mas de una salida.	
	e2) A B	La temporización de la lógica puede aplicarse a los estados de existencia y no existencia. Existe el estado de salida lógica No existe el estado de salida lógica	
	f1) A t1 B	La existencia continua de la entrada lógica A durante el tiempo t1, causa la existencia de la salida lógica B cuando t1 termina. B termina cuando A termina.	Evitar las alarmas molestas de nivel alto actuando la alarma, solo si el nivel permanece alto de forma continua duranto 0,5 seg.. La señal de alarma termina cuando no hay nivel alto. Nivel es Alto — s 0,5 — Actuar Alarma
	f2) A t2 t1 B	La existencia continua de la entrada lógica A durante el tiempo t1 causa la existencia de la salida lógica B cuando t expira. B termina cuando A ha terminado de forma continua durante el tiempo t2.	Purgar inmediatamente con gas inerte cuando la concentración de combustible es alta. Para la purga cuando concentración no es alta de forma continua durante 5 minutos. Concentración Combustibles es Alta — 5 min. 0 — Purgar con Gas inerte



FUNCIÓN	SÍMBOLO	DEFINICIÓN	EJEMPLO
4.8	f3) A t3 t4 B	La terminación de la entrada lógica A y su continua no existencia durante el tiempo t3 causa la existencia de la salida lógica B cuando t3 expira. B termina cuando o bien (1) B ha existido durante el tiempo t4, o bien (2) A existe de nuevo.	El vapor entra durante 15 min., empezando 6 min. después que el agitador ha parado, excepto que el vapor debe desconectarse si el agitador rearranca. Agitador en Operación — 6 min. 15 min. — Vapor On
	f4) A t1 t4 B	La existencia de la entrada lógica A, sin considerar su estado subsiguiente, causa la existencia de la salida lógica B cuando el tiempo t1 expira. B existe durante el tiempo t4 y luego termina.	Si la presión cae moméntaneamente a un valor bajo, bloquear inmediatamente el control modular turbina, mantenerlo 1 1/2 min., y seguidamente liberar turbina al control modulante. Presión Baja — 0 1½ min. — Bloqueo Control Modulante Turbina
	f5) A t4 t1 B	La existencia continua de la entrada lógica A durante un tiempo t1, causa la existencia de la salida lógica B cuando t1 expira. B existe en el tiempo t4, sin tener en cuenta el estado de A y luego termina *	Si el pH es continuamente bajo durante 1/2 min.. añadir sosa cáustica durante 3 min. pH Bajo — ½ min. 3 min. — Añadir Sosa Caústica
	f6) A t1 t4 B	La existencia continua de la entrada lógica A durante el tiempo t1 causa la existencia de la salida lógica B cuando t1 expira. B termina cuando bien (1) B ha existido durante t4, o bien (2) A termina *.	Si la temperatura es normal continuamente durante 5 minutos, añadir reactivo durante 2 min., con la excepción de que no debe añadirse si la temperatura es anormal. Temperatura Normal — 5 min. 2 min. — Añadir Reactivo
	* En los símbolos f4. f5 y f6. la acción de la salida lógica depende del tiempo de existencia continua de la entrada lógica A, hasta su rotura. Mas allá, el estado de A no es significativo en la secuencia de B. Si se desea tener un segmento de B, es decir, ir a la finalización solo si A existe continuamente, entonces A debe dibujarse mas allá del segmento. Si A se dibuja entre el inicio y el fin del segmento tiempo, entonces el segmento se iniciará y se completará sin considerar si A existe solo momentáneamente o por mas tiempo.		
4.9 ESPECIAL	A B Informe de Requerimientos Especiales	La salida lógica B existe con una relación respecto a la entrada lógica A tal como se especifica en el informe. Este puede cubrir una función lógica no especificada en esta norma o un sistema lógico que se define en otro lugar.	

Tabla 1.17c *Símbolos lógicos*

1.3.3.3 Resumen norma ISA-S5.3-1983

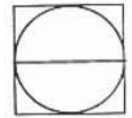
El objeto de esta norma es documentar los instrumentos formados por ordenadores, controladores programables, miniordenadores y sistemas de microprocesador que disponen de control compartido, visualización compartida y otras características de interfase.

Los símbolos representan la interfase con los equipos anteriores de la instrumentación de campo, de la instrumentación de la sala de control y de otros tipos de hardware.

El tamaño de los símbolos debe ser conforme a la norma ISA-S5.1, a la que complementa.

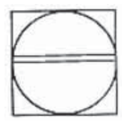
Símbolos de visualización del control distribuido/compartido

1. Accesible normalmente al operador-indicador/controlador/registrador o punto de alarma.



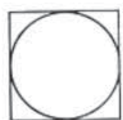
(1) Visualización compartida
(2) Visualización y control compartidos
(3) Acceso limitado a la red de comunicaciones
(4) Interfaz del operador en la red de comunicaciones

2. Dispositivo de interfase auxiliar del operador.



(1) Montado en panel, carátula analógica; no está montado normalmente en la consola principal del operador
(2) Controlador de reserva o estación manual
(3) El acceso puede estar limitado a la red de comunicaciones
(4) Interfaz del operador en la red de comunicaciones

3. No accesible normalmente al operador.



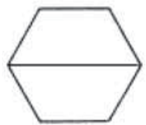
(1) Controlador ciego compartido
(2) Visualización compartida instalada en campo
(3) Cálculo, acondicionamiento de señal en controlador compartido
(4) Puede estar en la red de comunicaciones
(5) Normalmente operación ciega
(6) Puede ser alterado por la configuración

Símbolos del ordenador

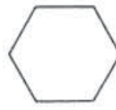
A utilizar cuando los sistemas incluyen componentes identificados como ordenadores, diferentes de un procesador integral que excita las varias funciones de un sistema de control distribuido.

El componente ordenador puede ser integrado en el sistema, vía la red de datos, o puede ser un ordenador aislado.

4. Normalmente accesible al operador-indicador/controlador/registrador o punto de alarma. Utilizado usualmente para indicar la pantalla de vídeo.



5. Normalmente no accesible al operador.



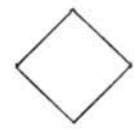
(1) Interfase entrada/salida

(2) Cálculo/acondicionamiento de señal de un ordenador

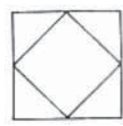
(3) Puede usarse como controlador ciego o como módulo de cálculo de software

Símbolos de control lógico y secuencial

6. Símbolo general. Para complejos no definidos interconectando control lógico o secuencial (ver ISA–S5.1-84).



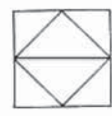
7. Control distribuido interconectando controladores lógicos con funciones lógicas binarias o secuenciales.



(1) Paquete de controlador lógico programable o controladores lógicos digitales integrales con el equipo de control distribuido

(2) No accesible normalmente al operador

8. Control distribuido interconectando un controlador lógico con funciones lógicas binarias o secuenciales.

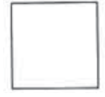


(1) Paquete de controlador lógico programable o controladores lógicos digitales integrales con el equipo de control distribuido

(2) No accesible normalmente al operador

Símbolos de funciones internas del sistema

9. Cálculo/acondicionamiento de señal.



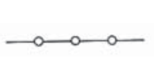
(1) Para identificación de bloque consulte ISA-S5.1-84 tabla 2 "Designaciones de funciones para relés"

(2) Para requerimientos de cálculo amplíos, use la designación "C". Escriba aclaraciones en la documentación suplementaria

(3) Utilizado en combinación con válvulas de alivio s/ ISA-S5.1-84

Símbolos comunes

10. Red del sistema.



(1) Usadoo para indicar una red de software o conexiones entre funciones suministradas en el sistema del fabricante

(2) Alternativamente, la red puede ser mostrada implícitamente por símbolos contiguos

(3) Puede utilizarse para indicar una red de comunicaciones a opción del usuario

Registradores y otros sistemas de retención de datos históricos

Los registradores convencionales, tales como los de gráfico de banda se mostrarán de acuerdo con ISA-S5.1-84.

En los registradores asignables, utilice el símbolo del párrafo 1. Accesible normalmente al operador-indicador/controlador/registrador o punto de alarma.

El almacenamiento en masa de largo plazo de una variable de proceso mediante memorias digitales como cinta, disco, etc., debe representarse de acuerdo con los símbolos de visualización de control distribuido/compartido o símbolos de ordenador de esta norma, dependiendo de la localización del aparato.

Identificación

Los códigos de identificación de esta norma deben cumplir con ISA-S5.1 con las siguientes adiciones.

Alarmas de software

Las alarmas de software pueden ser identificadas situando letras de designación de la tabla 1.1 de ISA-S5.1-84 en las líneas de señal de entrada o de salida de los controladores, o de otro componente específico integral del sistema. Ver la sección "Alarmas" que aparece posteriormente.

Contigüidad de los símbolos

Pueden unirse dos o más símbolos para expresar los significados siguientes, además de los mostrados en ISA-S5.1:

1. Comunicación entre los instrumentos asociados, por ejemplo, hilos de conexión, redes internas del sistema, reserva.
2. Instrumentos integrados con funciones múltiples, por ejemplo, registrador multipunto, válvula de control con controlador incorporado.

La aplicación de símbolos contiguos es una opción del usuario. Si su aplicación no es absolutamente clara, los símbolos contiguos no deben utilizarse.

Alarmas

Generalidades

Todos los aparatos y alarmas cableados, distintos de los aparatos y alarmas cubiertos específicamente por esta norma, deben estar de acuerdo con ISA-S5.1.

Alarmas de sistemas de Instrumentos

Las alarmas cubiertas por esta norma deben identificarse.

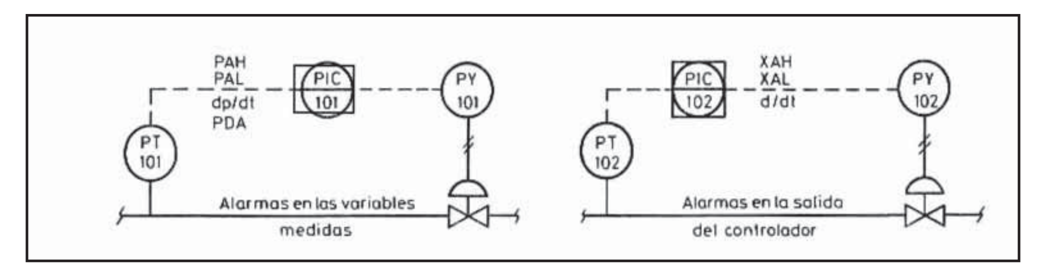


Figura 1.19 Alarmas cubiertas por la norma

Ejemplo de control de combustión:

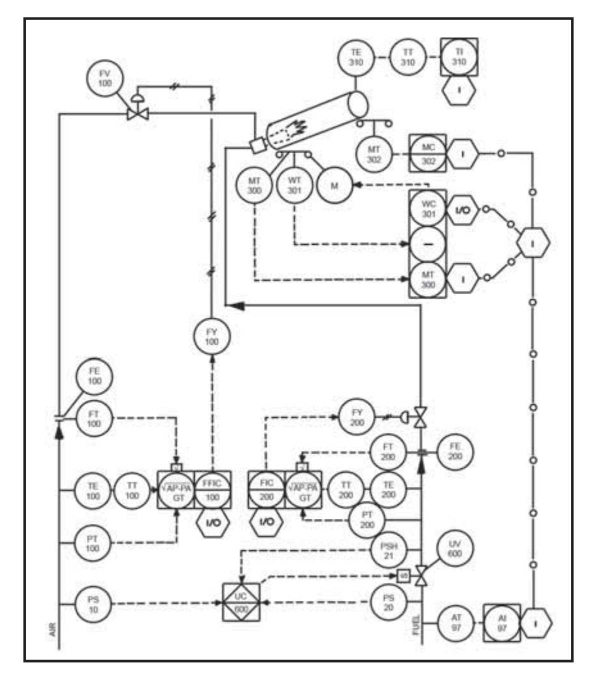


Figura 1.20 *Control de combustión*

Ejemplo de diagrama de flujo y lógico de un control en cascada con alarmas:

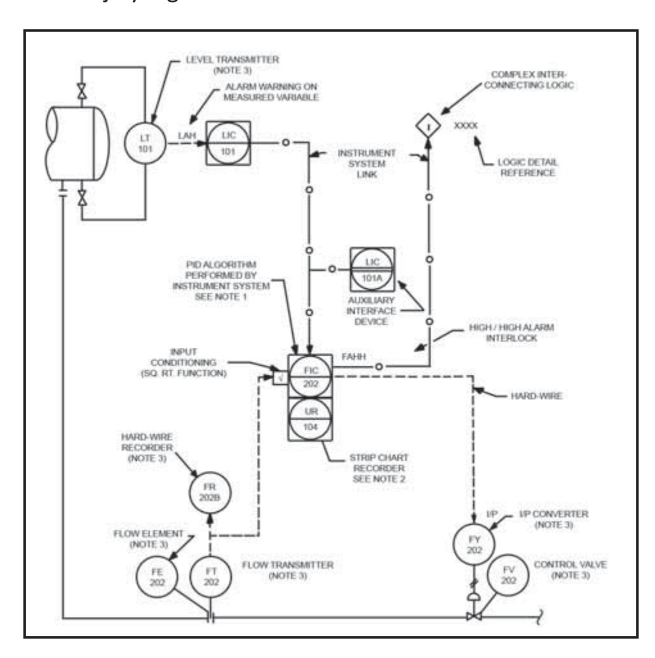


Figura1.21 *Diagrama de flujo y lógico de un control en cascada con alarmas*

1.3.3.4 Resumen norma ISA-S5.4-1991

Los diagramas de lazos de control se utilizan ampliamente en la industria presentando en una hoja toda la información necesaria para la instalación, comprobación, puesta en marcha y mantenimiento de los instrumentos, lo que facilita la reducción de costes, la integridad del lazo, la exactitud y un mantenimiento más fácil del sistema. Figuran a continuación algunos ejemplos de diagramas de lazos de control.

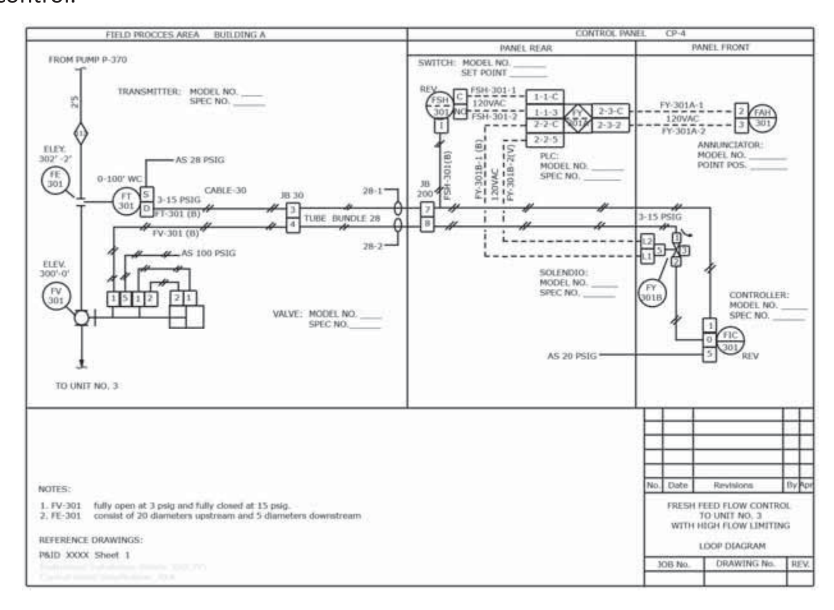


Figura 1.22 *Diagrama de control neumático*

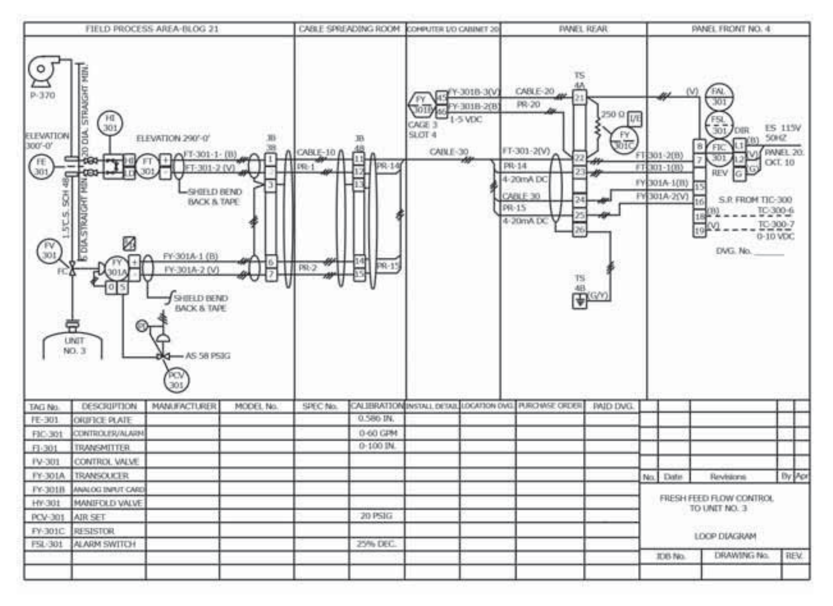


Figura 1.23 *Diagrama de control electrónico*

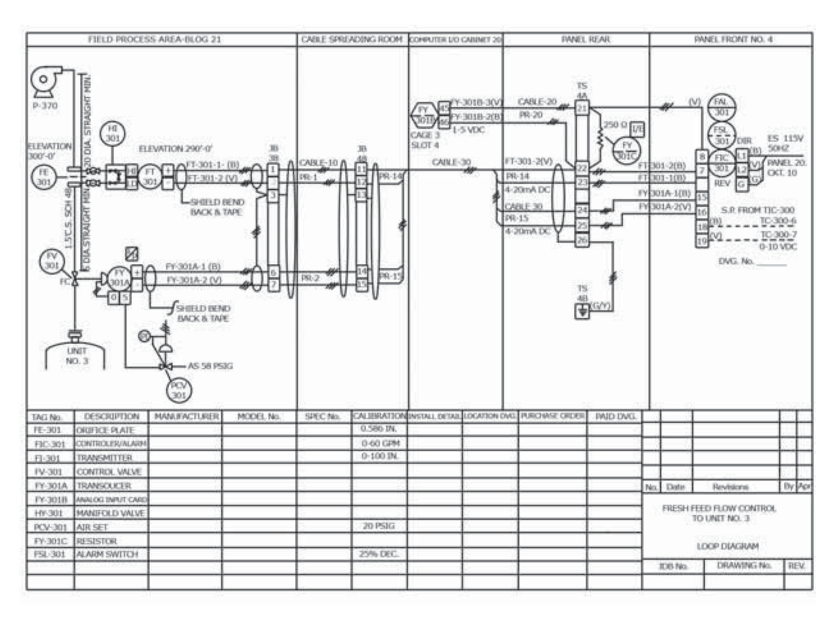


Figura 1.24 Diagrama de control por ordenador

1.3.3.5 Resumen norma ISA-S5.5-1985

En la tabla 1.18 se encuentra el estándar de colores de visualización de procesos de la norma ANSI/ ISA-S5.5-1985 (aprobada el 3 de febrero de 1986).

Color	Significado genérico	Elementos asociados
Negro	Emergencia	a) Paro
		b) Alarma de Muy Alta Prioridad
		c) Cerrado
		d) Desconectado (OFF)
Amarillo	Precaución	a) Condición anormal
		b) Alaram de Prioridad Secundaria
Verde	Seguridad	a) Operación Normal
		b) Arranque
		c) Abierto
		d) Conectado (ON)
Cyan (Azul Claro)	Estático y Significativo	a) Equipo de Proceso en Servicio
		b) Tarjetas Principales
Azul	No Esencial	a) Equipo de Proceso en Reserva
		b) Tarjetas, Tags, etc.
Magenta (Púrpura)	Radiación	a) Alarmas de Radiación
		b) Valores dudosos
Blanco	Datos Dinámicos	a) Información de Medida y de Estado
		b) Mensajes del Sistema
		c) Tendencias
		d) Paso Secuencial Activo

Tabla 1.18 Colores procesos en panel (norma ANSI/ISA-S5.1-1985)

1.3.3.6 Normas DIN e ISO

Las normas DIN se dividen en dos grupos:

- DIN 19227-1 *Símbolos gráficos y letras de identificación en control de procesos*.
- DIN 19227-2 *Símbolos gráficos y letras de identificación en control de procesos, representación de detalles*.
- DIN V 44366:2004-12 *Especificaciones de ingeniería de control de procesos en los diagramas P&I e intercambio de datos entre P&ID y PCE-CAE*.

Las normas ISO son parecidas a las ISA-S5.1:

- ISO 3511 *Industrial process measurement control functions and instrumentation - Symbolic representation*, partes 1 (año 77), 2 (año 84), 3 (año 84) y 4 (año 85).
- ISO 14617-1 a 15 *Graphical symbols for diagrams,* año 2002 a 2005.

	GRUPO I: VALORES DE MEDICIÓN U OTROS VALORES DE ENTRADA		GRUPO 2: ELABORACIÓN, FUNCIONES DEL PROCESO
	PRIMERA LETRA (2)	LETRA 1) COMPLEMENTARIA	LETRA SUCESIVA 2) SECUENCIA: I, R, C, ... etc.
A	Nota (3)		Aviso del valor límite, alarma
B			
C	Nota (3)		Control automático
D	Densidad	Diferencial	Nota (1)
E	Valores eléctricos (9)		Función de detección
F	Caudal, cantidad, paso	Relación	Nota (1)
G	Distancia, longitud, posición		
H	Manual (iniciado manualmente)		Valor límite superior (8)
I	Nota (3)		Indicación
J	Nota (3)		Nota (1)
K	Tiempo		
L	Nivel		Valor límite inferior (8)
M	Humedad		Valor intermedio (8)
N	Libre (4)		
O	Libre (4)		Señal visual, indicación SI y NO
P	Presión		
Q	Calidad o propiedades del material (análisis, propiedades sustancia) (exento D, M, V,), (5), (9)	Integral, suma	Nota (1)
R	Radiación (9)		Registro o impresión (7)
S	Velocidad lineal, velocidad rotacional, frecuencia		Disposición del circuito, control secuencial
T	Temperatura		Transmisor, transductor
U	Multivariable (6)		
V	Viscosidad		Función de la válvula de control o Equipo de regulación
W	Velocidad, masa		
X	Demás valores (4)		
Y	Libre (4)		Función de cálculo
Z			Interrupción de emergencia, dispositivo de seguridad

Tabla 1.19 Códigos de identificación de la norma DIN 19227

Notas de la tabla:

(1) Las letras que tienen una significación como letra complementaria no pueden utilizarse como letras sucesivas.
(2) Emplear solamente letras mayúsculas.
(3) Las primeras letras A, S, C, I, J y Z se reservan para una denominación futura.
(4) Las letras N, O e Y son libres. Esto significa que se pueden asignar a una variable de proceso de la planta, siempre que no estén contenidas en las primeras letras. Si se trata de un valor individual no asignado, debe emplearse la letra X.
(5) Valores de calidad o de propiedad del producto. Por ejemplo concentración, pH, conductibilidad, valor calorífico, punto de inflamación, índice de refracción, consistencia.
(6) Siempre que no puedan representarse con las primeras letras.
(7) El registro es la salida con función de memoria.
(8) A las combinaciones de las letras consecutivas SH, SN, SL pueden añadirse las letras CI para "con" y CO para "des".
(9) Letras de medición fuera del punto de medición y control.

Ejemplos de proceso:

TRCAH1L - COH2 -113: regulación de la temperatura por regulador primario con registro y alarma, con valor límite superior H1 y valor límite inferior L; función *cut-off* con valor límite superior H2 en central de medida.

FICAL -114: regulación de paso por regulador secundario, con indicación y alarma con valor límite inferior L en central de medida; elemento de ajuste cierra con fallo de la energía auxiliar.

FFIC -115: regulación proporcional con regulador primario (proporción determinada por QRAHL -117), indicación y regulación en central de medida.

FIC -116: regulación de paso por regulador secundario, en la central de medida, elemento de ajuste abre con fallo de la energía auxiliar.

QRAJIL / O2 -117: analizador de oxigeno con registro y alarma con valor límite superior H y valor límite inferior L, en central de medida, valor teórico para regulador proporcional FFIC -115.

XA -118: control de llamas con alarma, local.



Capítulo 2
Transmisores

2.1 Generalidades

Los transmisores captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática, electrónica, digital, óptica, hidráulica o por radio.

La señal neumática es de 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) (equivale a 0,206-1,033 bar o 0,21-1,05 kg/cm^2) adoptada en Estados Unidos y los países de habla inglesa, o 0,2-1 bar (20-100 kPa) empleada en los países que utilizan el sistema métrico decimal. La señal electrónica normalizada es de 4 a 20 mA de corriente continua, si bien se utilizan de 1 a 5 mA c.c., de 10 a 50 mA c.c. y de 0 a 20 mA c.c.

La señal digital consiste una serie de impulsos en forma de bits. Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1 (código binario), y representa el paso (1) o no (0) de una señal a través de un conductor. Si la señal digital que maneja el microprocesador del transmisor es de 32 bits entonces puede enviar 32 señales binarias (0 y 1) simultáneamente.

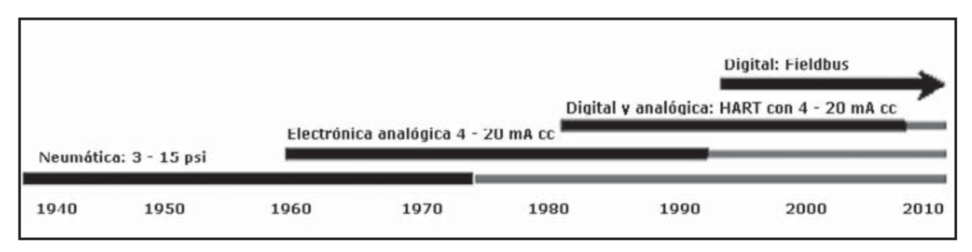


Figura 2.1 *Evolución de las señales de transmisión*

La señal hidráulica se utiliza cuando son necesarias presiones elevadas para el accionamiento de pistones hidráulicos en elementos finales de control.

Las señales de radio se emplean para la transmisión en ambientes hostiles (altas temperaturas, terrenos muy accidentados) y a grandes distancias (industria del petróleo). Las necesidades de los usuarios son el motor que impulsa el desarrollo de la instrumentación. Entre estas necesidades se encuentran:

- Aumento de la productividad.
- Aumento de la calidad del proceso.
- Repetibilidad de características de los productos fabricados. Es decir, el cliente no recibe un producto con mayor calidad de la indicada en sus especificaciones ni debe reclamar por recibir un producto de peor calidad de la especificada (normas ISO 9000).
- Reducción de los costes de fabricación (ahorro energético, etc.).
- Seguridad (se evitan malas maniobras que pueden causar pérdidas de producto).
- Normalización de los instrumentos.

La evolución de las señales de transmisión hacia la digital, propiciada por la irrupción de los microprocesadores, ha permitido satisfacer dichas necesidades. Las señales neumática y electrónica se utilizan cada vez menos en beneficio de la señal digital, por las ventajas que ésta ofrece en exactitud, en facilidad de comunicaciones y en grabación de la memoria histórica de las variables de proceso. La señal neumática ha quedado prácticamente relegada a su uso en las válvulas de control y en los posicionadores electro-neumático y dígito-neumático.

Dentro de la evolución de la instrumentación cabe destacar la aparición en 1983, por parte de la firma Honeywell, del primer transmisor digital denominado "inteligente" (*smart transmitter*), término que indica que el equipo tiene incorporadas funciones adicionales que se añaden a las propias de la medida y transmisión exclusiva de la variable. Y en 1986 aparece en el mercado el primer aparato que transmite directamente una señal digital al receptor, al que pronto sigue el transmisor digital de temperatura.

A partir de esta fecha se desarrollaron, rápidamente, una serie de protocolos digitales con el objetivo de comunicarse con el instrumento local o remotamente y aprovechar, al máximo, todas las potencialidades que ofrecen los microprocesadores. Este desarrollo tiende hacia la creación de protocolos abiertos que permitan el intercambio de instrumentos de diferentes fabricantes.

La exactitud que se consigue con las diferentes señales de transmisión es:

- ± 0,5% en los transmisores neumáticos.
- ± 0,3% en los transmisores electrónicos.
- ± 0,15% en los transmisores "inteligentes" con señal de salida de 4 a 20 mA c.c.
- ± 0,1% en los transmisores digitales.

2.2 Transmisores neumáticos

Los transmisores neumáticos se basan en el sistema tobera-obturador que, mediante bloques amplificadores con retroalimentación por equilibrio de movimientos o de fuerzas, convierte el movimiento del elemento primario de medición a una señal neumática de 3-15 psi (libras por pulgada cuadrada) o bien su equivalente en unidades métricas 0,2-1 bar (0,2-1 Kg/cm^2) (20-100 kPa), siendo su exactitud del orden del ± 0,5%.

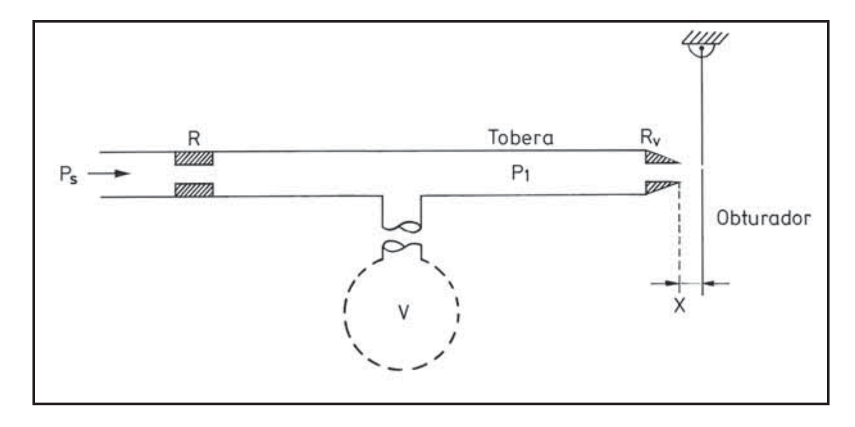


Figura 2.2 Transmisor neumático

Los transmisores neumáticos, al tener el diámetro de la tobera muy pequeño, del orden de 0,1 a 0,2 mm, son susceptibles de mal funcionamiento debido a las partículas de aceite o polvo que puedan tapar la tobera. Este problema de mantenimiento, unido al hecho de que no pueden guardar las señales de planta, hace que se utilicen cada vez menos.

2.3 Transmisores electrónicos

Basados en detectores de inductancia, o utilizando transformadores diferenciales o circuitos de puente de Wheatstone, o empleando una barra de equilibrio de fuerzas, convierten la señal de la variable a una señal electrónica de 4-20 mA c.c. Su exactitud es del orden del ± 0,5%.

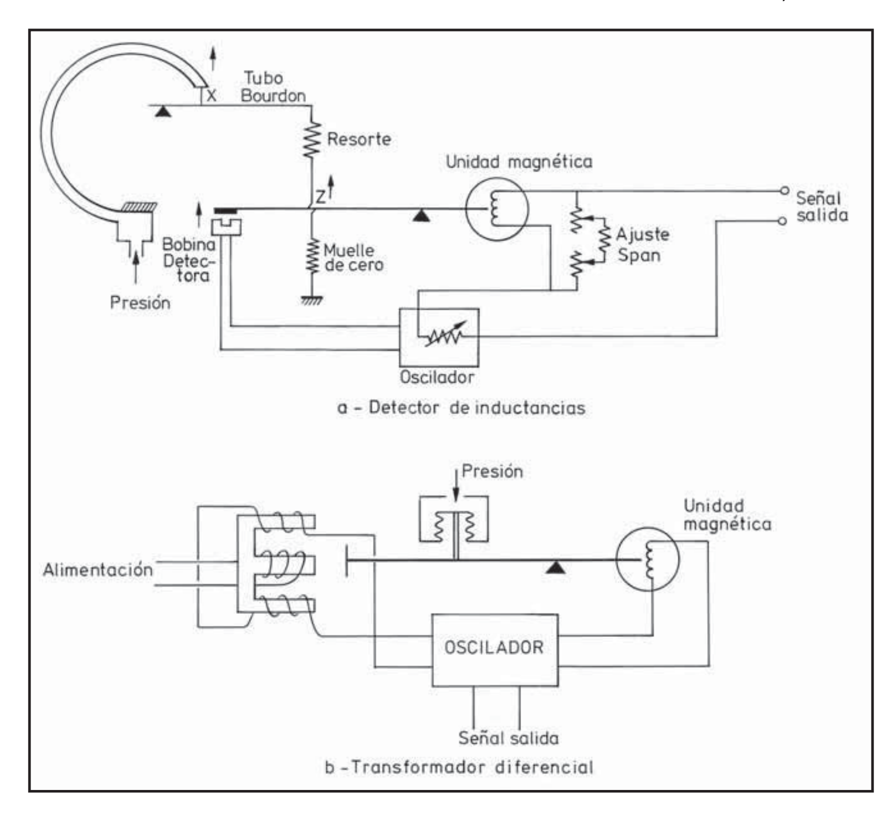


Figura 2.3 Transmisores electrónicos

Análogamente a los instrumentos neumáticos, no pueden guardar las señales de planta, y además son sensibles a vibraciones, por cuyo motivo su empleo ha ido disminuyendo.

El transmisor electrónico se alimenta con una fuente de 24 V c.c. y un circuito de dos hilos. El receptor dispone de una resistencia de 250 ohms conectada en los bornes de entrada. De este modo, si la señal de salida del transmisor varía de 4 mA c.c. a 20 mA c.c., se obtendrán las siguientes tensiones en los bornes de entrada al receptor:

250 ohmios × 4 mA c.c. = 1.000 mV = 1 V

250 ohmios × 20 mA c.c. = 5.000 mV = 5 V

Es decir, de 1 V c.c. a 5 V c.c. y no se pierde tensión en la línea ya que la resistencia de 250 ohms está conectada justo a la entrada del receptor.

2.4 Transmisores digitales

Cuando apareció la señal digital aplicable a los transmisores, mejoró notablemente la exactitud conseguida en la medida. La señal del proceso es muestreada a una frecuencia mayor que el doble del de la señal (teorema de muestreo de Nyquist-Shannon) y de este modo, la señal digital obtenida consiste en una serie de impulsos en forma de bits.

Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1 (código binario), y representa el paso (1) o no (0) de una señal a través de un conductor. Si la señal digital que maneja el microprocesador del transmisor es de 8 bits entonces puede enviar 8 señales binarias (0 y 1) simultáneamente. Como el mayor número binario de 8 cifras es:

$$11111111 = 1 + 1\times 2^1 + 1\times 2^2 + 1\times 2^3 + ... + 1\times 2^7 = 255$$

se sigue que la exactitud obtenida con el transmisor debida exclusivamente a la señal digital es de:

$$(1/255) \times 100 = \pm 0{,}4\%$$

Si la señal es de 16 bits entonces puede manejar 16 señales binarias (0 y 1). Siendo el mayor número binario de 16 cifras:

$$1111111111111111 = 1 + 1\times 2^1 + 1\times 2^2 + 1\times 2^3 + ... + 1\times 2^{15} = 65.536$$

se sigue que la exactitud debida exclusivamente a la señal digital de 16 bits es de:

$$(1/65.536) \times 100 = \pm 0{,}0015\%$$

Y si la señal es de 32 bits entonces puede manejar 32 señales binarias (0 y 1), siendo el mayor número binario de 32 cifras

$$111111....1111111111 = 1 + 1\times 2^1 + 1\times 2^2 + 1\times 2^3 + ... + 1\times 2^{31} = 8.589.833.772$$

se sigue que la exactitud debida exclusivamente a la señal digital de 16 bits es de:

$$(1/8.589.833.772) \times 100 = \pm 0{,}00000000116\%$$

El concepto de inteligencia quizás se desarrolló en el año 1905 en una batalla naval en el estrecho de Tsushima donde se enfrentaron dos formaciones navales clásicas con los buques en fila y el fuego por las bandas (artículo editorial de la revista *Automática e Instrumentación* de febrero de 1991). Mientras los buques de uno de los contendientes disparaban a discreción, en el otro contendiente sólo disparaba un buque y cuando hizo blanco en la columna enemiga, señaló el ángulo de tiro en un disco visible. De este modo, los buques de dicho bando emplearon toda su potencia de fuego de modo efectivo y al primer intento.

El término "inteligente" (*smart*) indica que el instrumento es capaz de realizar funciones adicionales a la de la simple transmisión de la señal del proceso. Estas funciones adicionales pueden ser:

- Generación de señales digitales.
- Comunicabilidad.
- Uso de otros sensores tales como de presión y temperatura para compensar las variaciones del fluido y conseguir una mayor exactitud.

- Cambio fácil de rangos. La "inteligencia" se aplica también a otras variables, tal como la temperatura donde el transmisor puede trabajar con distintas sondas de resistencia y termopares y diversos campos de medida, gracias a la linealización de las escalas y a la compensación de la unión fría que aporta el microprocesador.

El transmisor con señal de salida enteramente digital de Honeywell, aparecido en el año 1986, proporcionó un aumento de la exactitud del lazo de control del orden del 0,75%, al eliminar los convertidores A/D (analógico-digital) del transmisor y el D/A (digital-analógico) del receptor (indicador, registrador o controlador). El término "*smart*" no puede aplicarse al transmisor que sólo posee comunicabilidad digital (mediante un convertidor A/D), pero carece de funciones adicionales tales como corrección automática de la presión y temperatura del fluído de proceso.

Hay dos modelos básicos de transmisores digitales inteligentes, el capacitivo y el de silicio difundido.

2.4.1 Transmisor inteligente capacitivo

El sensor capacitivo está basado en la variación de capacidad que se produce, en un condensador formado por dos placas fijas y un diafragma sensible interno y unido a las mismas, cuando se les aplica una presión o presión diferencial a través de dos diafragmas externos. La transmisión de la presión del proceso se realiza a través de un fluido (aceite) que rellena el interior del condensador. El desplazamiento del diafragma sensible es de sólo 0,1 mm como máximo. Un circuito formado por un oscilador y demodulador transforma la variación de capacidad en señal analógica. Ésta, a su vez, es convertida a digital y pasa después a un microprocesador "inteligente" que la transforma a la señal analógica de 4-20 mA c.c y alimenta las comunicaciones digitales.

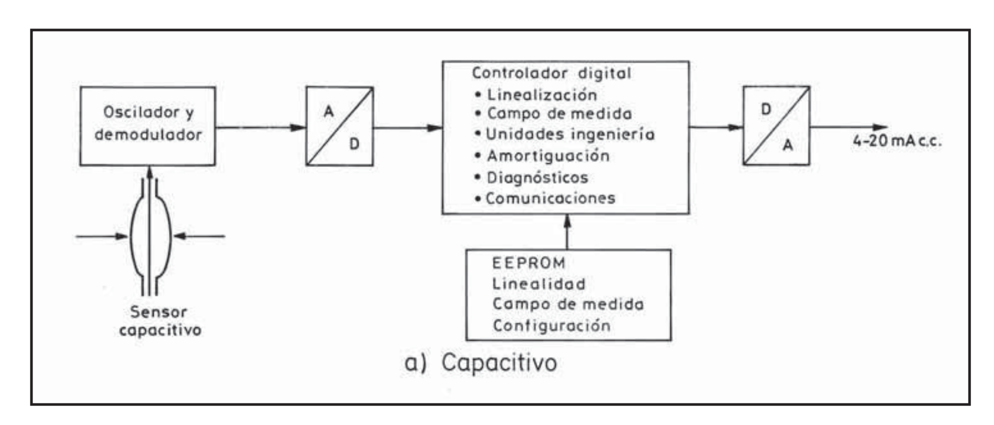


Figura 2.4 Transmisor inteligente capacitivo

2.4.2 Transmisor inteligente piezoresistivo

El sensor piezoresistivo está fabricado a partir de una delgada película de silicio y utiliza técnicas de dopaje para generar una zona sensible a los esfuerzos. Se comporta como un circuito dinámico de puente de Wheastone que incorpora un microprocesador.

Cuando no hay presión, las tensiones E_1 y E_2 son iguales y, al aplicar la presión del proceso, R_B y R_C disminuyen su resistencia y R_A y R_D la aumentan, dando lugar a caídas de tensión distintas y a una diferencia entre E_1 y E_2. Esta diferencia se aplica a un amplificador de alta ganancia que controla

un regulador de corriente variable. Un margen de corriente continua de 3 a 19 mA con 1 mA del puente produce una señal de salida de 4 a 20 mA c.c. Esta corriente circula a través de la resistencia de realimentación R_{FB} y eleva E_1 a una tensión equivalente a E_2 y reequilibra el puente. Como la caída de tensión producida a través de R_{FB} es proporcional a R_B, esta resistencia fija el intervalo de medida (*span*) del transductor. El cero del instrumento se varía intercalando resistencias fijas en el brazo izquierdo del puente (cero basto) y un potenciómetro en el brazo derecho (cero fino).

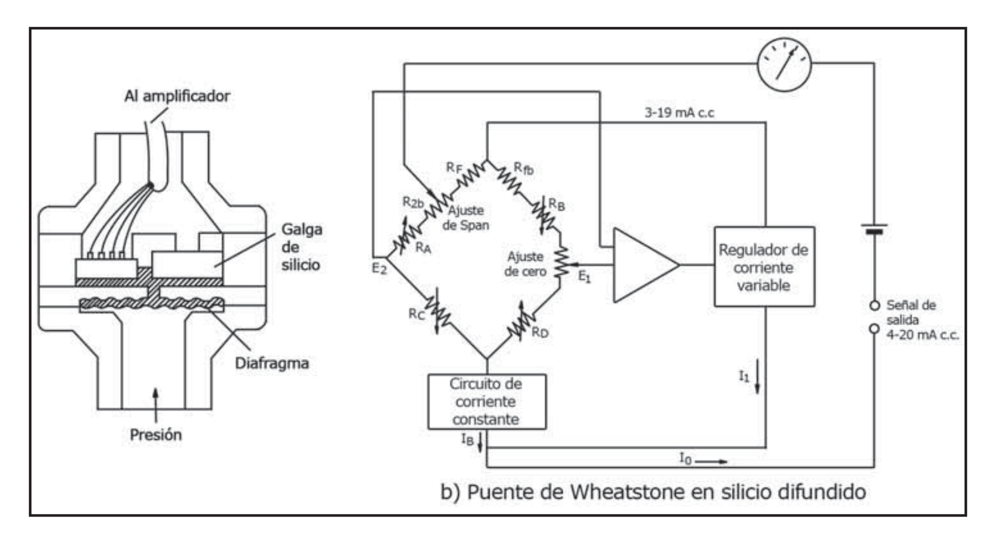


Figura 2.5 *Transmisor inteligente piezoresistivo*

El elemento de medida incorpora tres sensores: presión diferencial, temperatura y presión estática. El cuerpo del medidor y la caja electrónica son muy robustos y resisten vibraciones, corrosión y humedad.

2.4.3 Ventajas e inconvenientes

En los instrumentos inteligentes, de salida electrónica o digital, en particular en los transmisores, la calibración se ve facilitada por la "inteligencia" proporcionada por el microprocesador incorporado en el instrumento. Este guarda digitalmente en una EPROM los datos que proporcionan correcciones precisas de las no linealidades de los sensores ante las variaciones en la temperatura y en la presión ambiente. Un comunicador portátil dotado de visualizador de cristal líquido y teclado alfanumérico permite comprobar desde el propio transmisor o bien desde el controlador, o desde cualquier punto de la línea de conexión el estado y calibración del transmisor.

Mientras el elemento primario en contacto con el fluido de proceso no se averíe, el transmisor inteligente tiene una vida útil casi ilimitada. La calibración que se realiza en fábrica se lleva a cabo para una gran variedad de temperaturas ambientes, y la temperatura interna del transmisor es registrada en la memoria EPROM. La calibración se realiza para un total de 125 medidas o más en el transmisor. Todo ello proporciona, después, una gran estabilidad de calibración cuando el instrumento ya está trabajando en campo.

Comparando los 125 puntos anteriores con los dos básicos (cero y *span*) y tres opcionales de comprobación (25%, 50% y 75% de la escala) del transmisor convencional, se evidencia la gran diferencia

en estabilidad de calibración en los dos tipos de transmisores. A señalar que el transmisor analógico puede presentar averías por desgaste mecánico de los tornillos de ajuste de cero y *span* provocado por un gran número de calibraciones realizadas a lo largo del tiempo por el instrumentista.

De este modo, la exactitud de los instrumentos digitales puede alcanzar el ± 0,1%.

Otras ventajas adicionales de estos transmisores son:

- **Cambio automático del campo de medida**, caso de que el valor de la variable salga del campo y fijación de la variable en el último valor alcanzado, caso de detectarse alguna irregularidad en el funcionamiento del aparato.
- **Compensación de las variaciones de temperaturas** y tensiones de referencia de los transmisores y autoajuste desde el panel de control.
- **Grabación de datos históricos.** La señal digital permite guardar los datos y analizarlos con más detalle posteriormente. Ha permitido que los operadores de proceso pierdan el temor a los registradores y se han acostumbrado rápidamente a la facilidad y al dominio de la planta, al tener una visión total de la marcha de la misma.
- **Mantenimiento**. Antes de su aparición, la calibración y el cambio del margen de medida debían realizarse normalmente en el taller de instrumentos, lo que equivalía a disponer de aparatos de repuesto para continuar trabajando con el proceso, siendo inevitable la marcha a ciegas durante el tiempo requerido para el cambio mecánico del instrumento. Por ejemplo, la calibración de un instrumento de nivel típico requiere el vaciado del tanque, el desmontaje del aparato y su calibración en el taller de instrumentos. Además, si se precisa que el proceso continúe en funcionamiento, es necesario montar una brida ciega en la brida del transmisor de nivel para poder llenar el tanque y continuar las operaciones de fabricación.

  Así pues, tanto en la puesta en marcha como en operación, los instrumentos "inteligentes" no precisan de aparatos patrón para su calibración, pues disponen de datos almacenados en EEPROM en fábrica (bajo normas NBS), por lo que la eventual calibración que pueda realizarse en el taller será de peor calidad que la efectuada con el comunicador. Su utilización representa un ahorro del 95% en los costos de recalibración de los instrumentos efectuados en los instrumentos convencionales.
- ***Rangeability*** (relación señal máxima/señal mínima o dinámica de medida). En variables específicas, tal como el caudal, el transmisor inteligente proporciona una mejora en la relación caudal máximo/caudal mínimo que pasa de 3:1 en la placa orificio (o tobera o tubo venturi) a 10:1 manteniendo la misma exactitud del ± 1%. Por otro lado, la mejora conseguida en la exactitud de la medida de temperatura permite una relación "*turndown*" (relación entre el nivel mínimo de la variable al máximo que es medible conservándose la exactitud de la medida del instrumento) de 400:1 como máximo (teniendo en cuenta que para valores del campo de medida pequeños la exactitud se vería afectada), lo que posibilita la reducción drástica del número de transmisores en stock al poder utilizar prácticamente un sólo modelo para cubrir los diferentes campos de medida.
- **Autocalibración por variaciones del proceso.** Los transmisores inteligentes también disponen de autocalibración, es decir, suplen las operaciones del ajuste del cero y del 100 de los instrumentos, trabajo desarrollado clásicamente por los instrumentistas. Un ejemplo de las técnicas de autocalibración lo constituyen los transmisores de nivel por ultrasonidos. Disponen de un reflector de las ondas sónicas que está situado en el tanque sobre la superficie del líquido y hacia donde el emisor dirige periódicamente los ultrasonidos, ajustando entonces los parámetros

de calibración. De este modo, compensa las variaciones de velocidad del sonido provocadas por cambios en la temperatura del ambiente del tanque. En otros casos, la autocalibración es más difícil de conseguir. Tal ocurre en los medidores magnéticos de caudal en los que durante los intervalos de calibración sería necesario pasar por el elemento un caudal conocido de un fluido determinado.

- **Autodiagnóstico.** Los transmisores inteligentes se prestan también al autodiagnóstico de sus partes electrónicas internas, función que proporciona al Departamento de Mantenimiento, primero, el conocimiento de la existencia de un problema en el circuito, segundo el diagnóstico y la naturaleza del problema, señalando que instrumento ha fallado y tercero, las líneas a seguir para la reparación o sustitución del instrumento averiado.
- **Comunicador portátil.** Para visualizar la señal de salida, los datos de configuración, el margen de funcionamiento y otros parámetros, y cambiar los ajustes del campo de medida se utiliza un comunicador portátil, que se conecta en cualquier punto de la línea de transmisión. Un comunicador portátil dotado de visualizador de cristal líquido y teclado alfanumérico permite comprobar desde el propio transmisor o bien desde el controlador, o desde cualquier punto de la línea de conexión, el estado y calibración del transmisor. Así pues, ya no es necesario para calibrar estos instrumentos su desmontaje del proceso y su transporte al taller de instrumentos. Basta, tal como se ha indicado, conectar el comunicador y cambiar si se desea el margen del instrumento. Si se presenta una avería directa en el elemento en contacto con el proceso (por ejemplo, una perforación en la membrana de un transmisor de nivel) precisará el cambio del aparato o del módulo en contacto con el proceso, pero tampoco será necesaria la calibración en el taller con aparatos patrón.
- **Ordenador personal (PC).** El transmisor, o varios transmisores, pueden conectarse, a través de una conexión RS-232, a un ordenador personal que con el software adecuado es capaz de configurar transmisores inteligentes.
- **Otras ventajas.** Si el transmisor inteligente, en lugar de incorporar dos hilos de señal analogica 4-20 mA c.c., incorpora comunicaciones *Profibus* y *Foundation Fieldbus*, emplea sólo un hilo de transmission de las señales digitales y el costo de mantenimiento es más reducido.

Sin embargo, existen algunas desventajas:

- **Normalización de las comunicaciones digitales**, no está plenamente resuelta.
- **Respuesta frecuencial defectuosa.** Dependiendo de la frecuencia de la señal, ésta será transmitida con poca fidelidad por el retardo inherente del microprocesador que debe realizar secuencialmente diferentes acciones de cálculo. Si la señal es rápida, por ejemplo, presión y caudal, o bien interesa la máxima fidelidad en la señal tal como en temperatura, el microprocesador responderá con retraso, con lo cual la señal quedará distorsionada. Este último punto debe, pues, valorarse y, caso de no poder admitirse esta distorsión, deben emplearse instrumentos clásicos analógicos que son de respuesta mucho mas rápida.

En el futuro, puede afirmarse que la tecnología digital evolucionará todavía más, integrando totalmente la información de la planta con un flujo de información continuo entre las diversas áreas de la planta (fabricación, mantenimiento, laboratorio y gestión).

La aplicación de los instrumentos neumáticos y electrónicos analógicos quedará limitada a pequeñas plantas, ya que frente a la instrumentación digital tienen una peor relación costo/prestaciones y no disponen de la facilidad de comunicación ni la de almacenamiento de datos entre instrumentos que posee la digital.

Mediante el bus de campo es posible transmitir, digitalmente en serie, las señales de los transmisores al sistema de comunicaciones y a los controladores (control distribuido, controladores programables, bloques de control). De este modo, se mejora la exactitud de los datos y la fiabilidad, se reduce la mano de obra de cableado y es posible disponer de una función de mantenimiento remoto.

2.5 Transmisión de señales por radio

Una instalación industrial típica del control de procesos precisa de sensores, transmisores y multitud de hilos que comunican la señal electrónica de 4-20 mA c.c. al panel de control o bien, en el caso de control digital, un hilo por el que circulan en serie las señales de la planta. Cuando el entorno es hostil, o es necesario transmitir señales a gran distancia, la transmisión por radio es una necesidad. Se utilizan señales de 902-928 MHz en la banda ISM moduladas en dispersión, es decir, se varía intencionadamente la frecuencia de la señal transmitida, lo que reduce la intercepción no autorizada y la coexistencia de señales parecidas en la frecuencia.

La distancia de operación entre el emisor y el receptor puede ser de unos 70 a 1000 metros sin línea de visión directa y de unos 1.000 metros a 30 Km en espacios abiertos.

El estándar ISA100.11a proporciona comunicaciones industriales sin hilos, multifuncionales, que pueden manejar miles de aparatos en las plantas y soporta protocolos de comunicaciones *HART*, *Fieldbus Foundation*, *Profibus*, *DeviceNet*, etc.

Un sistema típico de transmisión se basa en una radio base que puede aceptar las señales de hasta 50 unidades de comunicación digitales en el protocolo *Modbus* o en la señal electrónica analógica de 4-20 mA c.c. Las ventajas del sistema son el ahorro de cable (30 a 120 €/metro), un arranque más rápido de la instalación, distancias de transmisión en zonas sin obstáculos de hasta 600 m, una exactitud del ± 0,1%, una fiabilidad gracias a la larga vida de la batería (5 años) y al software de autocomprobación de los aparatos, y el estar libres de interferencia gracias a las frecuencias de transmisión de 902-928 MHz con el protocolo digital que usa el sistema FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), que modula las señales de datos con una portadora saltando de frecuencia en frecuencia en una banda ancha. La potencia de transmisión en radiofrecuencia es de unos 30 mW y la velocidad puede ser de 4,8 Kbps, 19,2 Kbps y 76,8 Kbps. Cada bloque de datos transmitido se verifica y es confirmado por la radio base.

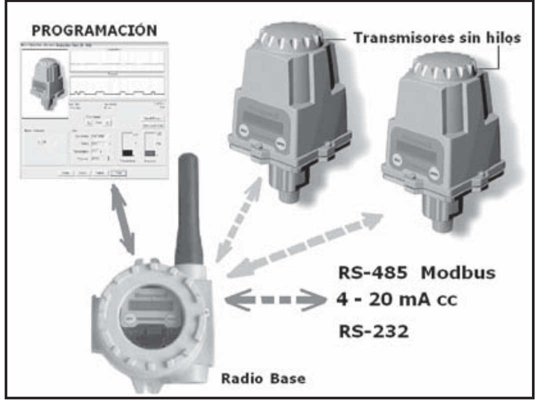




Figura 2.6 Transmisión de señales de proceso vía radio. Fuente: Honeywell

Las señales de proceso transmitidas por radio son típicamente digitales con las presiones relativa y absoluta y la temperatura (termopares y sondas de resistencia), y analógicas con la presión, la temperatura, nivel, caudal, pH o señales en tensión (0-10 V) o corriente (4-20 mA c.c.). El sistema puede transmitir sonidos de alta frecuencia o anormales, generados por válvulas de alivio, purgadores y bombas y compresores para así detectar su malfuncionamiento. En la figura 2.6 puede verse este tipo de transmisión.

2.6 Comunicaciones

Las comunicaciones entre los instrumentos de proceso y el sistema de control se basan en señales analógicas neumáticas (0,2-1 bar utilizadas en pequeñas plantas y en las válvulas de control), electrónicas de 4-20 mA c.c. y digitales, siendo estas últimas capaces de manejar grandes volúmenes de datos y guardarlos en unidades históricas, las que están aumentando día a día sus aplicaciones.

En áreas remotas o de difícil acceso tienen cabida los transmisores sin hilos típicamente de presión, señales acústicas y temperatura que transmiten sus medidas a un aparato base de radio conectado a un sistema de control o de adquisición de datos.

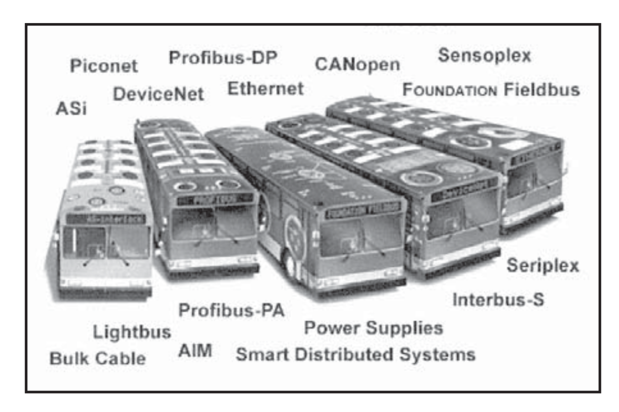


Figura 2.7 Buses

La exactitud de las señales digitales es de unas 10 veces mayor que la señal clásica de 4-20 mA c.c. En lugar de enviar cada variable por un par de hilos (4-20 mA c.c.), transmiten secuencialmente las variables a través de un cable de comunicaciones llamado bus. El término bus indica el transporte secuencial de señales eléctricas que representan información codificada de acuerdo con un protocolo.

Los fabricantes de sistemas de comunicaciones empezaron con sus propios sistemas llamados propietarios, es decir sin que fuera posible intercambiar sus aparatos con los de otros fabricantes. Sin embargo, han llegado por lógica a fabricar sistemas abiertos, debido a la demanda del mercado. Es natural que un fabricante se resista a divulgar su sistema debido al alto coste que ha pagado por la investigación y el desarrollo de su producto, pero el deseo del cliente se impone a la larga.

2.6.1 Protocolos serie

Las comunicaciones entre instrumentos se iniciaron con el puerto serie, por el cual se puede realizar la configuración del mismo, ver diagnósticos, tendencias, etc

Las *interfases serie* más extendidas son:

RS-232. Con 25 años de antigüedad, es la interfase para aplicaciones de comunicaciones de datos. Básicamente es una configuración eléctrica no equilibrada para la transmisión de señales digitales en una banda base simple. Dispone de tres conductores: uno de transmisión, otro de recepción y un tercero de retorno de corriente común para ambos tipos de datos, que constituye la fuente principal de limitaciones de este tipo de interfase. El cable actúa como una antena que no solamente irradia señales a los circuitos próximos sino que también es susceptible de recibir señales no deseadas procedentes de fuentes externas y debe apantallarse en las instalaciones industriales.

Los datos se transmiten en lógica negativa, es decir, los "unos" se traducen en una tensión continua negativa y los "ceros" en una tensión continua positiva. La tensión más comúnmente utilizada es ± 12 V c.c.

La distancia máxima de transmisión entre el equipo de transmisión de datos (DTE) y el equipo de comunicación de datos (DCE) es de unos 15 m y la velocidad de transmisión máxima es de 20 Kbaudios (9.200 baudios en el entorno industrial) (1 baudio = bit/segundo).

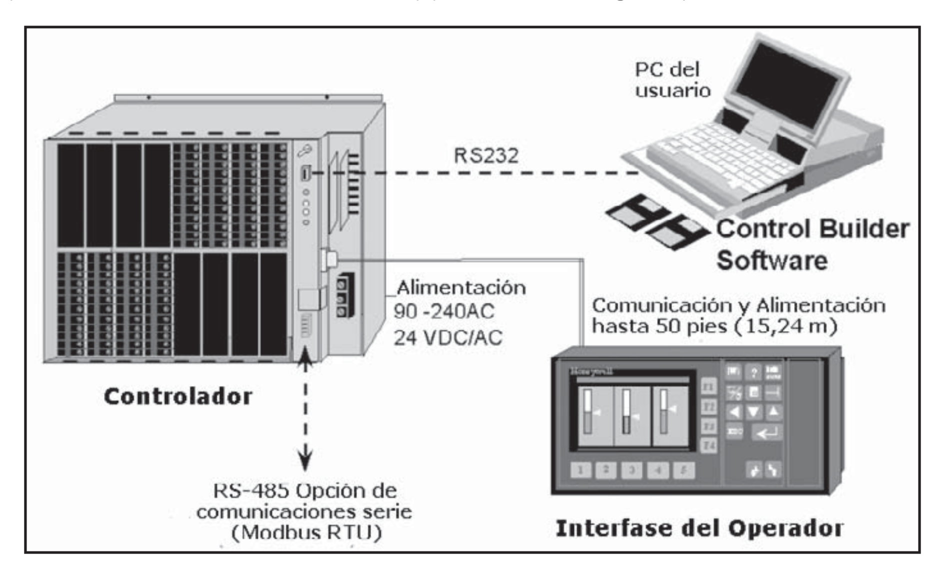


Figura 2.8 Comunicaciones serie

RS-422. Apareció en 1978, diseñado para satisfacer las demandas de mayor distancia y mayor velocidad de transmisión. Sin embargo, no ha alcanzado el grado de utilización que cabía esperar debido, probablemente, a que gran parte de las comunicaciones serie se realizan en entornos eléctricamente limpios como oficinas, donde además, los equipos se hallan próximos unos de otros. Puede alcanzar los 1200 metros, pero para la velocidad máxima de 10 Mbaudios, la distancia queda limitada a 60 m.

RS-485. Introducido en 1993 por *Electronic Industries Association* (EIA), este estándar está diseñado para comunicaciones multipunto y se aplica cuando el número de estaciones es menor de 32 y los requerimientos, en cuanto a cantidad de datos por segundo a transmitir, son moderados y además sea prioritario garantizar al máximo la integridad de los datos transmitidos. La distancia de comunicación máxima es de 1200 m y la velocidad de transmisión 10 Mbits/s.

2.6.2 Protocolos híbridos

Los *protocolos híbridos* utilizan el estándar analógico de comunicación 4-20 mA c.c., e incorporan, además, un protocolo de comunicación digital. Son:

DE. Desarrollado por la empresa Honeywell, consiste en una modulación en corriente correspondiendo al estado discreto "1" una corriente de 20 mA c.c. y al estado "0", 4 mA c.c. Es compatible con la señal analógica 4-20 mA c.c., pero no simultáneamente. Usa un protocolo propietario.

INTENSOR. Es un protocolo propietario de Endress & Hauser.

BRAIN. De la empresa Yokogawa y consiste en una modulación de impulsos codificados, cuyo estado discreto "1" corresponde a la ausencia de pulsos, mientras que el estado "0" corresponde a una secuencia de dos pulsos de subida y dos de bajada alternos con una amplitud de 2 mA c.c. Dicha señal va modulada sobre la señal de 4-20 mA c.c., que no es afectada ya que la señal resultante es nula.

FOXCOM. Es un protocolo propietario de la compañia Foxboro.

FSK. Desarrollado por Elsag Bailey Hartman and Braun (grupo ABB), está basado en una modulación en frecuencia. La distancia máxima es de 1,6 Km. Es propietario.

HART. El protocolo HART (*Hight way Addresable Remote Transducer*) fue desarrollado originariamente por la firma Rosemount pero, dada su gran aceptación, ha sido extendido a muchos otros fabricantes. Rosemount creó la fundación HART a la que se han adherido decenas de fabricantes de todo el mundo.

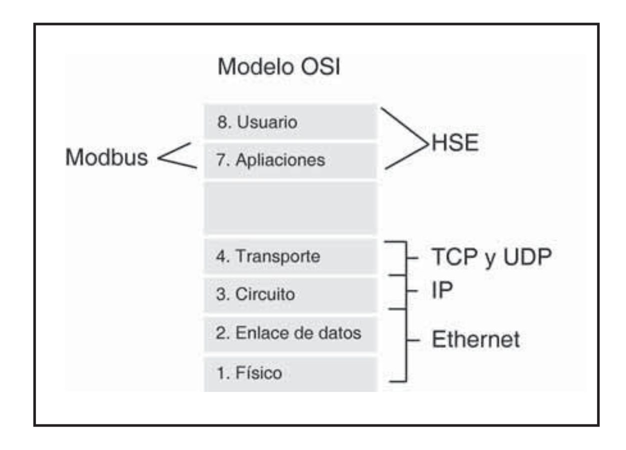


Figura 2.9 OSI (Open Systems Interconection)

El protocolo HART utiliza el estandar Bell 202 FSK de codificación por cambio de frecuencia y sigue el modelo de referencia OSI (*Open Systems Interconnections*) propuesto por ISO (Organización Internacional de Normalización), si bien, sólo implementa del modelo los niveles 1, 2 y 7, ya que los otros niveles no son necesarios para este tipo de comunicación. Ello permite a los usuarios prepararse para la implementación definitiva del bus enteramente digital.

El nivel 1 (nivel físico) conecta físicamente los dispositivos y modula en frecuencia una señal de ± 0,5 mA de amplitud superpuesta a la señal analógica de salida del transmisor de 4-20 mA c.c.

Codifica los estados lógicos 1 y 0 con las frecuencias de 1.200 Hz para el 1 y 2.200 Hz para el 0, en forma senoidal. Como la señal promedio de una onda senoidal es cero, no se añade ningún componente de c.c. a la señal analógica de 4-20 mA c.c.

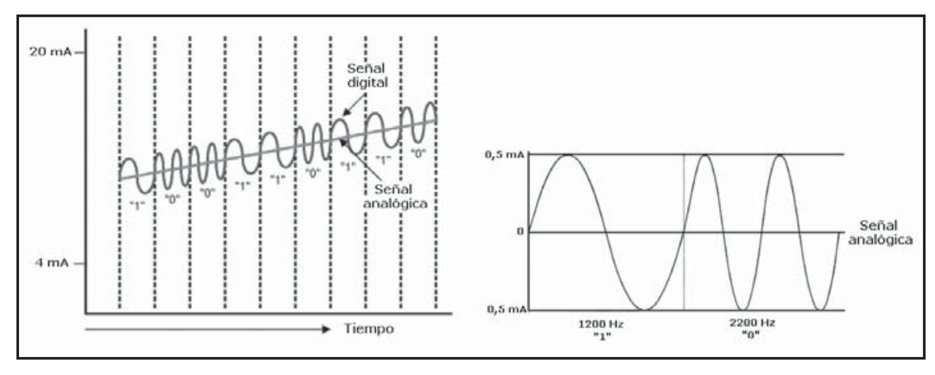


Figura 2.10 Protocolo HART

La variable de proceso es la señal analógica, mientras que la digital aporta medidas adicionales (configuración y calibración de instrumentos, diagnósticos, etc.) lo que es una gran ventaja al implantar HART, ya que esta tecnología es compatible con los sistemas existentes.

El nivel 2 (nivel de enlace) se encarga de formar y comprobar la trama de los mensajes de acuerdo con la especificación del protocolo HART. La trama incluye una comprobación de doble paridad para asegurar la máxima integridad de los datos transmitidos.

El nivel 7 (nivel de aplicación) se basa en la utilización de comandos HART, conjunto de comandos que se envían al transmisor para obtener información de los datos y cambiar la configuración de los parámetros a distancia. Algunos de estos comandos son:

- Leer y escribir el "mensaje".
- Leer el "fabricante", tipo de equipo, "rango", "unidades" y "*damping*" (amortiguamiento), "variable primaria", "unidades", "señal de salida", "% del rango", "número de serie", límites del sensor, etc.
- Escribir el "rango del transmisor", el "*damping*" (amortiguamiento), calibrar (ajuste de cero y *span*), autotest, etc.

El protocolo HART permite soportar hasta 256 variables, los transmisores pueden conectarse entre sí a través de un bus y comunicarse con 15 aparatos (PLC, ordenadores, etc.). La integración digital de los instrumentos con los sistemas de control queda implantada definitivamente con los *buses de campo*, pudiendo aprovechar toda la potencialidad de los microprocesadores desde el punto de vista de configuración, diagnósticos, mantenimiento, etc.

MODBUS. El primer bus de campo, efectivamente abierto, utilizado ampliamente fue el MODBUS de Gould Modicon desarrollado en 1979, que sólo disponía de los niveles 1 (físico) y 2 (enlace). Comunica instrumentos inteligentes y sensores, puede monitorizar instrumentos de campo mediante PCs y es ideal en aplicaciones de transmisión de señales de proceso por radio.

El protocolo *MODBUS TCP/IP* desarrollado por Schneider Automation facilita la interoperatibilidad entre los aparatos que utilizan los códigos de funciones MODBUS.

2.6.3 Protocolos abiertos

Los protocolos de comunicaciones abiertos importantes son el HART, World FIP, ISP, BITBUS, INTERBUS-S, P-NET, ECHELON y CAN. De ellos, los que usan el protocolo Fieldbus son World FIP (usa H1 y H2) y Profibus PA (sólo usa H1). Los restantes no utilizan ninguna parte del estándar Fieldbus y, por lo tanto, no son fieldbuses.

Los buses de campo existentes en el mercado en la actualidad son, entre otros: Lonworks, Interbus, ASI, Devicenet, CAN, P-NET, World FIP, Profibus y Foundation Fieldbus.

2.6.3.1 Profibus

Profibus es una red abierta, muy popular en Europa, estándar e independiente de fabricantes (interoperable). Dispone de tres perfiles de usuario: Profibus FMS (universal), Profibus DP (rápido) y Profibus PA (orientado a la aplicación con automatización de procesos incluso en áreas con riesgo de explosión y comunicación con equipos de campo).

El nivel físico cumple la norma IEC 1158-2 y la IEC 61158-2 y posibilita la alimentación de los equipos por el mismo par de hilos.

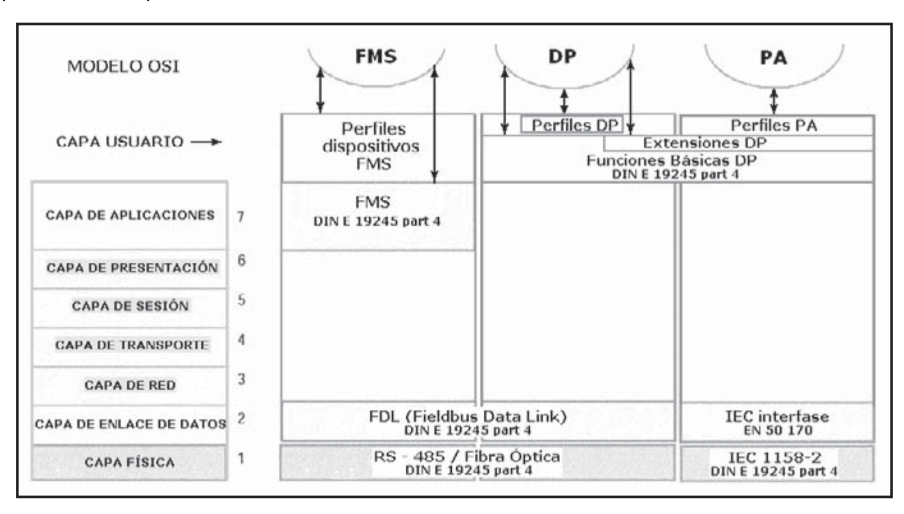


Figura 2.11 Profibus

Profibus está basado en el modelo de referencia OSI e implementa los niveles 1 y 2. El nivel de usuario normaliza las funciones básicas de todos los instrumentos, de tal manera que aparatos de distintos fabricantes son intercambiables. Así, si se cambia un medidor de caudal de un fabricante por otro, la lectura será la misma. Todos los parámetros accesibles al usuario como código (*tag*) del instrumento, unidades, descripción, alarmas, diagnósticos, etc., son suministrados mediante ficheros en lenguaje DDL (*Device Description Languaje*).

2.6.3.2 Foundation Fieldbus

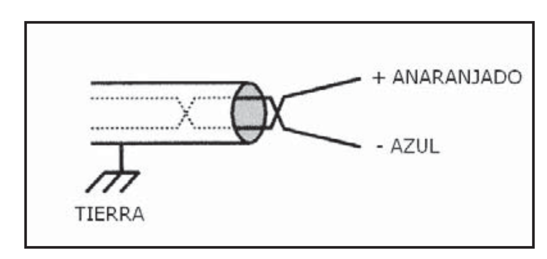
Foundation Fieldbus (FF) es una tecnología de control abierta, no propietaria, resultante de la cooperación entre fabricantes de instrumentos de control y usuarios. Consiste en un bus de datos digital, serie y multipunto entre dispositivos de campo y/o sistemas de un entorno industrial. El

estándar Fieldbus está diseñado para satisfacer las necesidades restrictivas establecidas por la norma IEC 1158-2. La idea básica del estándar Fieldbus es obtener más información sobre el proceso y sobre el propio instrumento, que naturalmente debe ser inteligente (*smart*), y establecer reglas de rendimiento, seguridad y detección de errores. Proporciona un bus de campo H1 (31,25 Kbits/s) para un control continuo y una red *Ethernet* de alta velocidad (HSE) para la integración de datos en una distribución jerárquica de la planta.

La Fundación Fieldbus (*Fieldbus Foundation*) fue creada en 1994 mediante la unión de ISP y World FIP, para definir un único estándar según las normas IEC-ISA (*International Electric Company/Instrument Society of America*). Es una organización sin ánimo de lucro formada por los casi 120 proveedores y usuarios más importantes de automatización y control de procesos.

Los sistemas de instrumentos de seguridad de Foundation Fieldbus cumplen la norma IEC 61508 hasta el SIL 3 (*Safety Integrity Level 3*). En el año 2006, la agencia TÜV (*Rheinland Industrie Service GmbH, Automation, Software and Information Technology*), certificó que los instrumentos de Foundation Fieldbus eran adecuados para funciones de seguridad en las plantas industriales. Por otro lado, las organizaciones NAMUR (Alemania) y JEMIMA (Japón) soportan Foundation Fieldbus.

Básicamente, la instalación está formada por un par de cables torsionado con un blindaje puesto a tierra, que conecta los dispositivos de la sala de control (que pueden estar en campo en pequeñas instalaciones) con los instrumentos de campo (transmisores, válvulas de control, etc.). Estos pueden conectarse entre sí mediante un bloque de terminales con topología en árbol (*chickenfoot*) o bien a lo largo del cable en *ramales* (*spur*). Un terminador acopla la impedancia del cable para reducir reflexiones de la señal y un acondicionador de alimentación separa la fuente de alimentación convencional del cableado del Fieldbus.



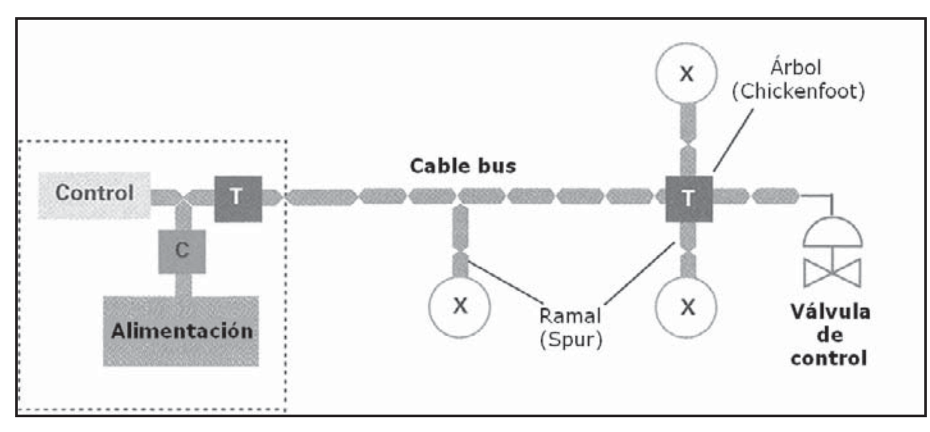


Figura 2.12 Cable y circuito del Foundation Fieldbus

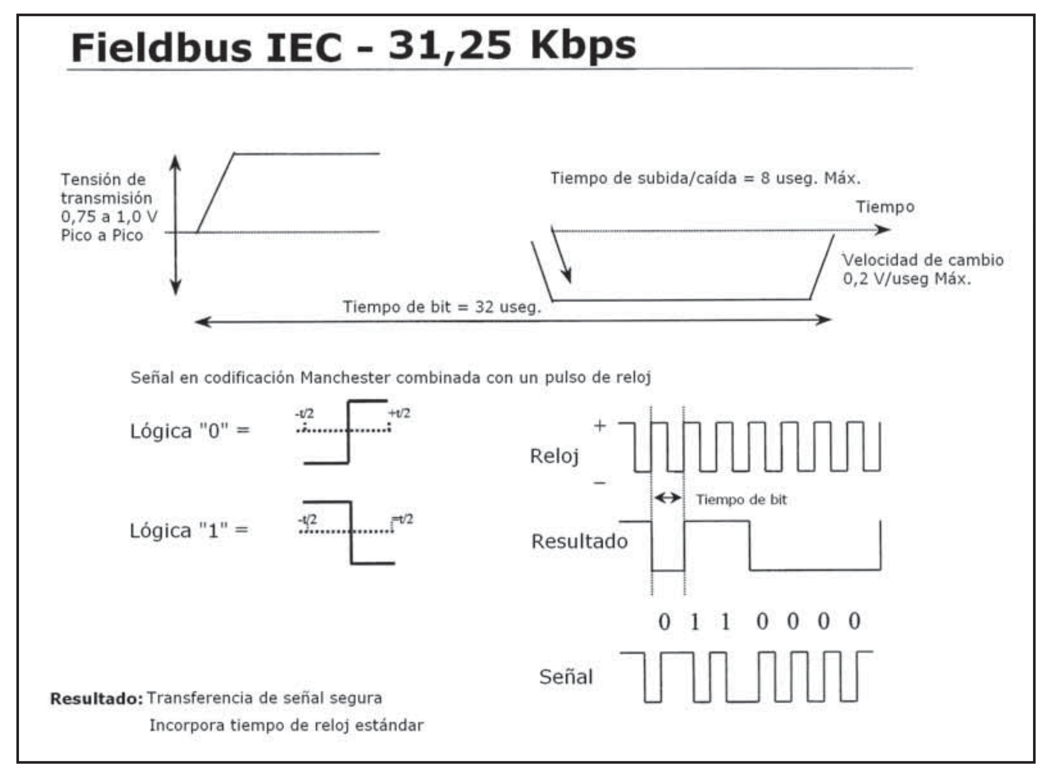


Figura 2.13 *Señal de transmisión Fieldbus*

La señal transmitida por el nivel físico está codificada con la técnica Manchester y los datos digitales se envían por el Fieldbus con una corriente de + 10 mA a la velocidad de 31,25 Kbits/s (1 bit = 32 microsegundos). Esta corriente se entrega a una impedancia de 50 ohms, creando una tensión de transmisión de 0,75 a 1,0 V, pico a pico.

Cada mensaje se compone de una señal previa, una señal delimitadora de arranque y una señal delimitadora de fin e, intercalada, entre estas dos últimas, una señal de datos de longitud máxima 266 bytes que contiene la dirección del instrumento, su identificación, los valores de medida, etc.

Para especificar que instrumento puede transmitir, y no llenar la línea de un caos de mensajes, un aparato especial llamado Programador Activo de Enlace (*Link Active Scheduler - LAS*) envía un mensaje especial a cada instrumento para permitir que efectúe su transmisión.

Otro aparato de enlace (*linking device*) interconecta los 31,25 Kbits/s de los Fieldbuses (tarjeta H1) y los hace accesibles a la red *Ethernet* de alta velocidad (*HSE = High Speed Ethernet*) de 1 Mbits/s a 2,5 Mbits/s (tarjeta H2). Como la red *Ethernet* utiliza protocolos estándar, por ejemplo TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*), el equipo HSE (interruptores, etc.) puede crear circuitos de gran longitud.

La distancia de transmisión está limitada y se calcula de la siguiente forma:

Alimentación

Cable tipo A (0,8 mm^2 de sección) de 0,022 W/m. Atenuación de 3 dB/Km.

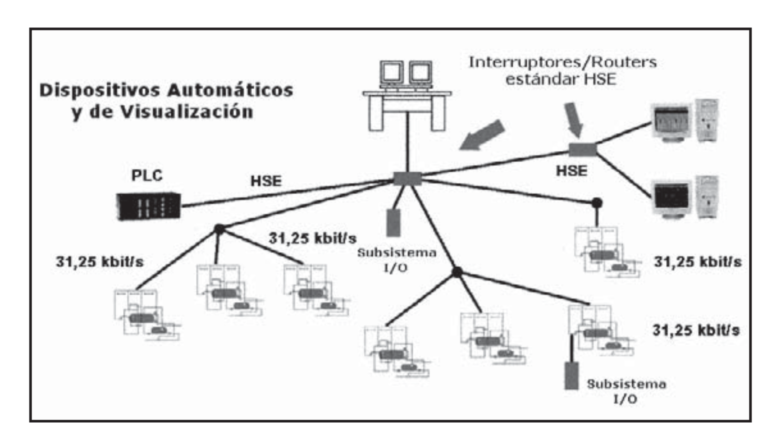


Figura 2.14 *Enlace de los circuitos H1 (31,25 Kbit/s) con los H2 (1-2,5 MBits/s) a través de la red Ethernet (HSE = High Speed Ethernet) del Foundation Fieldbus*

Para un instrumento conectado con 2 cables de 1 metro, con alimentación mínima en las bornas de 10 V (precisa entre 10 y 42 V c.c.), aportando 24 V en la fuente menos 2 V absorbidos por la impedancia, y estando la resistencia de carga del lazo comprendida entre 0 y 1.500 ohms, la longitud aproximada es de:

$$\textit{Caída máxima} = 22 - 10 = 12\ V \qquad \textit{Resistencia} = (2L + 2) \times 0{,}022$$

Según el gráfico del fabricante, a 55 V de alimentación corresponden 1935 ohm de carga. Por lo tanto, el consumo es de 55/1935 = 28 mA c.c.

$12\ V = 28\ mA\ c.c. \times (2L + 2) \times 0{,}022$, con lo que $L = 8{,}7\ Km$

Transmisión

La señal de salida del transmisor es de 1 V (pico a pico). La señal que llega al receptor es más pequeña y debe ser como mínimo de 0,15 V (pico a pico). Estando la atenuación expresada en dB (decibelios), resulta:

$$\text{Atenuación} = 20\log\frac{\textit{amplitud señal transmitida}}{\textit{amplitud señal recibida}} = 20\log\frac{1}{0{,}15} = 16{,}48\ dB$$

$$\textit{Distancia máxima} = 16{,}48/3 = 5{,}5\ Km$$

Para saber el número de aparatos que pueden alimentarse de la red, suponiendo que esta tiene una longitud de 1 km, resulta:

Consumo de cada aparato = 20 mA c.c.

Resistencia del cable = 22 × 2 × 1 = 44 ohms

Caída de tensión utilizable por el cable = 22 - 10 = 12 V

Corriente de alimentación en la estrella (*chickenfoot*) = 12/44 = 270 mA c.c.

Número de aparatos = 270/20 = 13 aparatos

La tensión normal de alimentación es de 24 V c.c. Puede comprobarse la resistencia del cable Fieldbus con un polímetro digital normal, midiéndola desde un extremo del cable con el otro extremo en cortocircuito. La resistencia al aislamiento de cada uno de los cables debe ser de 10 Kohms o superior.

Un tester de cable de Fieldbus está formado por dos partes, transmisora y receptora, que se fijan en las partes extremas del cable. En el ensayo, luces en el receptor indican el buen funcionamiento del par de cables para que circulen las señales Fieldbus. El *bloque de ensayo de interoperatibilidad* (*H1 Interoperability Test Kit (ITK) v5.1*) comprueba la funcionalidad de los aparatos de campo H1 (31.25 Kbits/s) y su conformidad a las especificaciones de los bloques de función y transductor de Foundation Fieldbus.

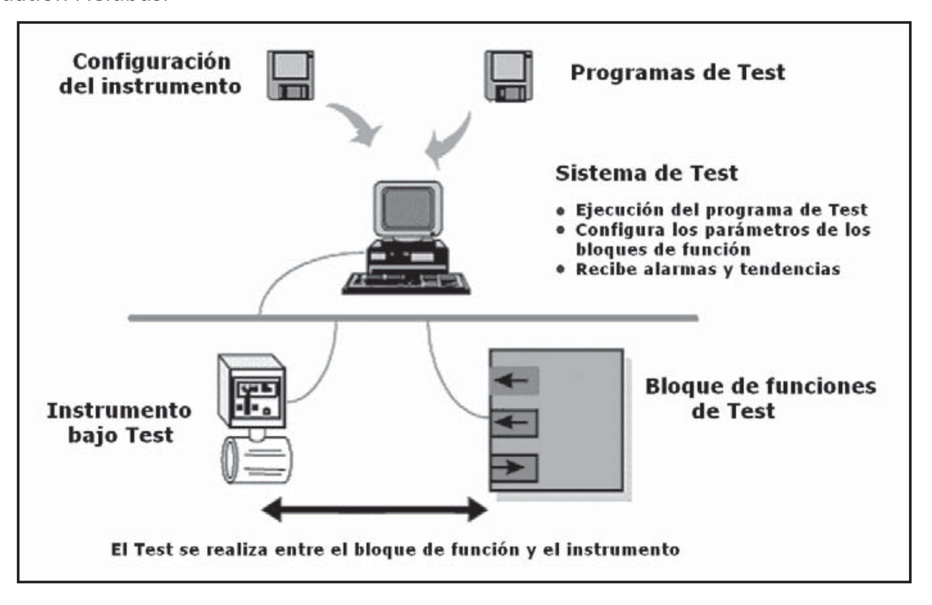


Figura 2.15 Tester de interoperatibilidad (H1 ITK v5.1). Fuente: Fieldbus Foundation

Las comunicaciones de Foundation Fieldbus utilizan dos tipos de tarjetas:

a) La tarjeta H1 (IEC 61158) es de baja velocidad (31,25 Kbits/s) de uso normal en la industria en instrumentos de proceso y en válvulas. Se caracteriza por:

- Los mismos cables proporcionan la alimentación y las comunicaciones.
- La señal analógica 4-20 mA c.c. circula por los mismos cables.
- Seguridad intrínseca para áreas peligrosas (IEC/ISA).
- Bus primario para dispositivos de proceso.
- Distancias de transmisión hasta 1.580 m (5.200 pies).

La tecnología H1 puede ejecutar funciones de control, reduciendo así la carga de trabajo de las estaciones de trabajo y de los ordenadores de la planta. En plantas petroquímicas, el diagnóstico avanzado del sistema disminuye los costos de operación en un 30%. Las comunicaciones digitales son menos susceptibles al ruido eléctrico que las señales analógicas.

b) La tarjeta H2 es de alta velocidad (1,0/2,5 Mbits/s) en desarrollo y aplicable a PLC, DCS, señales remotas I/O, caracterizada por:

- Adquisición de datos (supervisión de temperaturas,etc.).
- Redundancia.

- Integra hasta 32 Fieldbuses H1.
- Soporta PLC y equipos de fabricación.
- Puede integrar otros buses.
- Distancias de transmisión hasta 760 m (2.500 pies).

Los segmentos H2 utilizan el estandar HSE (*High Speed Ethernet*) en configuración redundante (hasta 100 Mbits/s). Los dos protocolos *Ethernet* y Fieldbus se complementan mutuamente, estando incluidos en el estándar IEC 61158. Sin embargo, casi todos los protocolos con base *Ethernet* son propietarios, por lo que si bien los aparatos en la red *Ethernet* pueden interconectarse, usualmente no es posible su interoperatibilidad. Esto es debido a que el estándar solo especifica el cable, la dirección del puerto del hardware y del aparato; y la aplicación no incluye ni las capas del usuario abiertas necesarias para conseguir una completa interoperatibilidad en el circuito.

Foundation Fieldbus utiliza tres niveles o capas del sistema OSI (*Open Systems Interconect*) de siete capas:

- *Nivel 1 (Capa 1) - Nivel Físico* que proporciona una transmisión transparente de los datos entre los niveles (capas), recibe mensajes del *stack* de comunicaciones, los convierte en señales físicas, los adapta y coloca en el medio de transmisión y viceversa. Viene definido por los estandares IEC 1158-2 (1993) e ISA-S.50.02 (1992).

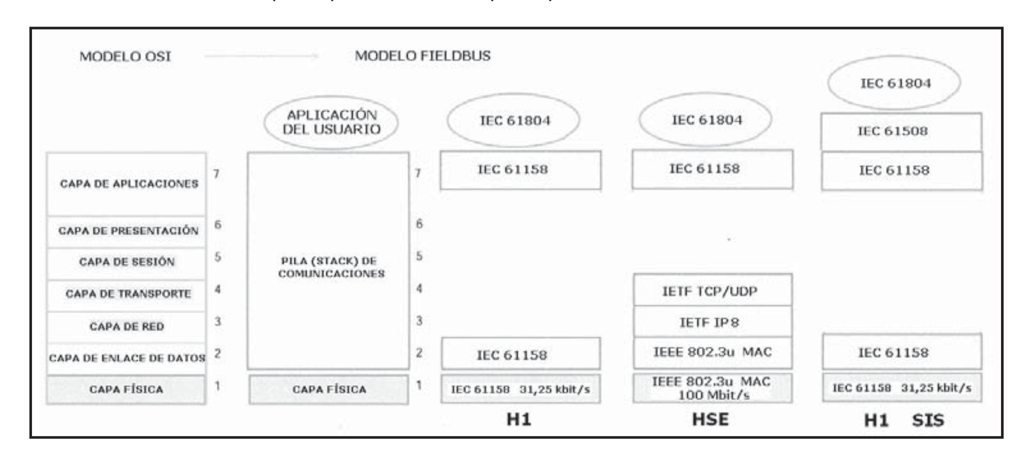


Figura 2.16 Capas del Foundation Fieldbus basadas en el modelo OSI

- *Nivel 2 (Capa 2) - Nivel de Enlace de Datos* (niveles 2 y 7 del modelo OSI) que establece el enlace lógico (DDL), el control de acceso al medio (FAS) y la especificación de mensajes (FMS) incluyendo el control de flujo y de errores.
- *Nivel 3* al *6 (Capas 3 a 6) - Red, Transporte, Sesión, Presentación* que son objeto de protocolo.
- *Nivel 7 (Capa 7) - Nivel de Aplicación* que contienen los servicios y regula la transferencia de mensajes entre las aplicaciones del usuario y los diferentes instrumentos. Utiliza un conjunto de comandos que se envían al transmisor para obtener información de los datos y cambiar la configuración de los parámetros a distancia. Algunos de estos comandos son:
    - Leer y escribir el mensaje.

- Leer el fabricante, tipo de equipo, rango, unidades, variable primaria, señal de salida, % del rango, número de serie, etc.
- Escribir el rango del transmisor, calibrar, autotest, etc.

- *Nivel de usuario (Capa usuario) - Dedicada* basada en bloques que representan las diferentes funciones de aplicación. Los bloques son:
    - Bloque de recursos o RB (*Resource Block*): características del dispositivo, fabricante, modelo y número de serie.
    - Bloque de Transductor o TB (*Transducer Block*): tipo de sensor, fecha de calibración, estado del sensor, etc
    - Bloques de Función o FB (*Function Block*): con las estrategias de control del sistema (entrada analógica, control PID, alarmas, ratio, selector de control, etc.) y gestión de alarmas, históricos y parámetros, a acceder a nivel de las estaciones de operación.

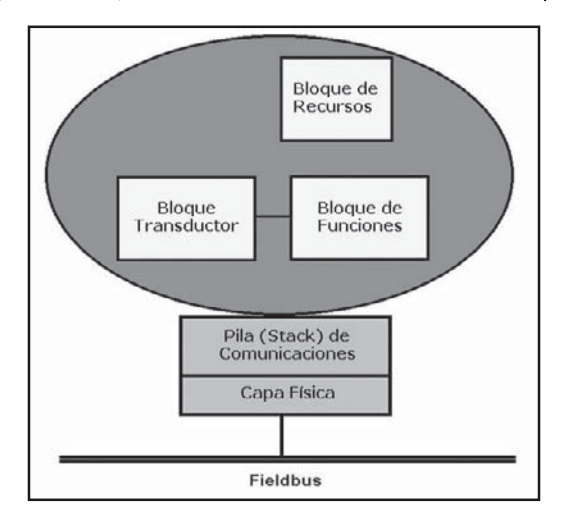


Figura 2.17 Nivel de usuario (bloques de funciones)

Los bloques de funciones se encuentran en un dispositivo. El fabricante genera un informe de ensayo en el que se describen todas las características del dispositivo *DDS* (*Device Description Services*) mediante un lenguaje *EDDL* (*Electronic Device Description Language*) que permite escribir un fichero de texto *EDD* (*Electronic Device Description*) que define los bloques de función. Cualquier ordenador que use el intérprete del DDS será capaz de operar con todos los parámetros definidos en el dispositivo, mediante la lectura de su descripción *DD* (*Device Description*). El lenguaje EDDL soporta HART, Foundation Fieldbus, PROFIBUS, etc., y como detalle de su utilización, en el año 2006, existían más de 20 millones de instrumentos compatibles con el lenguaje EDDL.

Estos bloques son típicamente AI (Entrada Analógica - *Analog Input*), AO (Salida Analógica - *Analog Output*), DI (Entrada Digital - *Digital Input*), DO (Salida Digital - *Digital Output*), PID (Proporcional + Integral + Derivativo), INT (Integrador), SPG (Generador de Punto de Consigna en Rampa - *Set Point Ramp Generator*), Temporizador (*Timer*) , LLAG (Adelanto Retardo - *Lead Lag*), etc., y se encuentran dentro de la capa del usuario proporcionando funciones estándar, tales como entradas y salidas analógica y digital, control PID, etc.

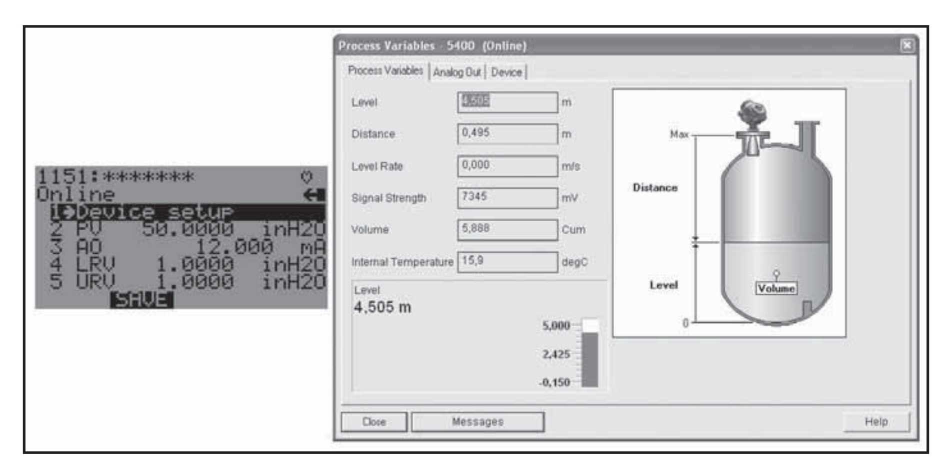
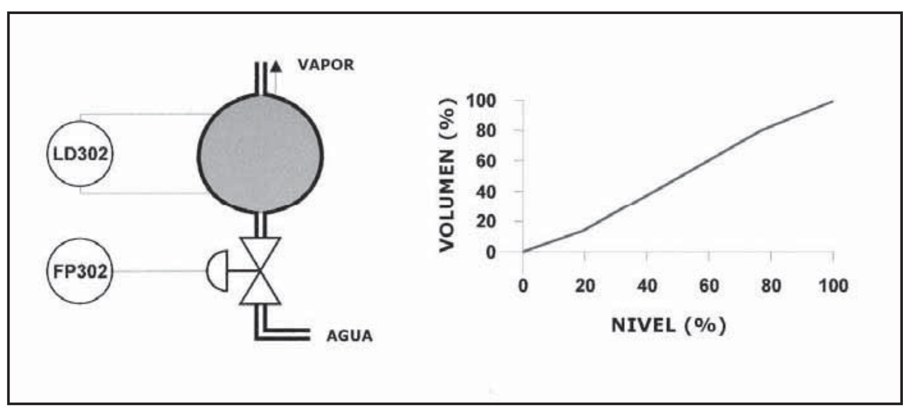


Figura 2.18 *Lenguaje EDDL y aplicación gráfica. Fuente: EDDL technical description*

Las funciones proporcionadas por estos bloques han sido definidas por los mayores fabricantes de equipos de automatización trabajando de forma coordinada, de modo que cada fabricante sabe que sus instrumentos serán intercambiables con los de los otros fabricantes.



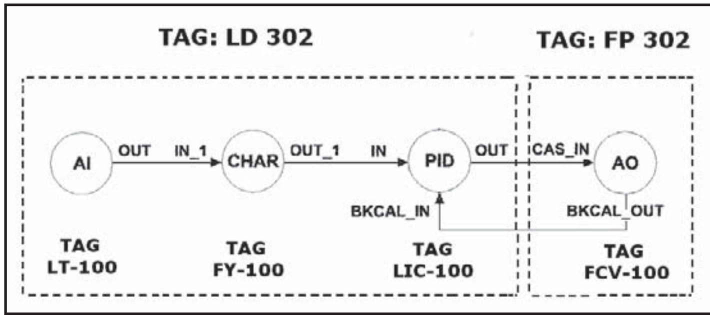


Figura 2.19 *Funciones (bloques de un control de nivel)*

La interoperabilidad es uno de los aspectos críticos satisfechos por FF. Esto quiere decir que se pueden interconectar y operar dispositivos de varios fabricantes en la misma red sin pérdida de funciona-

lidad, es decir, se puede sustituir un equipo de un fabricante por otro, pudiendo utilizar de inmediato las prestaciones extras que nos dé este segundo dispositivo.

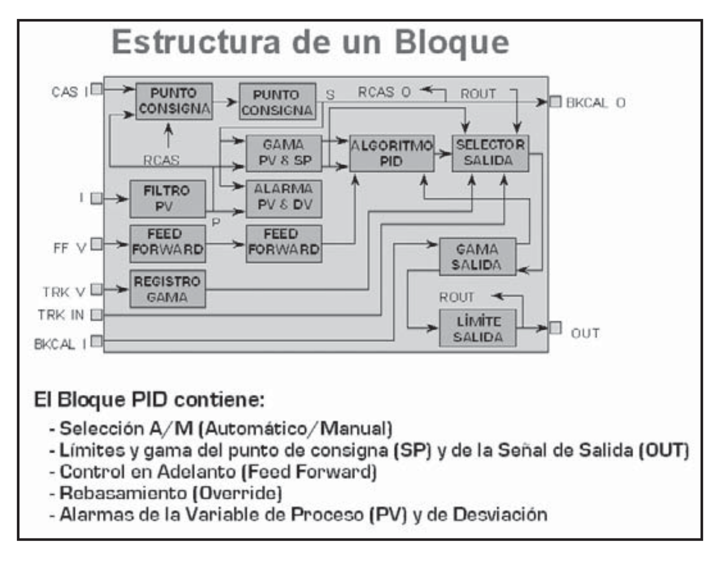


Figura 2.20 *Estructura de un bloque de función PID*

La interoperabilidad se asegura gracias a la definición de los bloques de función estandarizados y a la tecnología de descripción de dispositivos. Se han creado perfiles de instrumentos estándar (caudalímetros, transmisores de caudal, nivel, temperatura, etc.) para las pequeñas y medianas empresas, de tal manera que estas compañías fabricantes pueden definir su modelo de instrumento por referencia al perfil normalizado.

La configuración de los aparatos se realiza conectando, en cada aparato, las entradas y salidas de los bloques de función. Una vez realizadas las conexiones y la configuración, el dispositivo de configuración genera información de cada aparato del Fieldbus. Un maestro de enlace (*Link Master*) puede configurar un lazo aislado del sistema, con lo que este lazo puede operar de forma continua sin necesidad de una consola central.

Algunos de los fabricantes que suministran instrumentos digitales que cumplen el estándar Fieldbus son:

- ABB, Dresser Valve Division, Endress + Hauser, Fieldbus Inc., Fisher Controls International, Inc, Fisher-Rosemount Systems, Inc, Foxboro (and Foxboro-Eckardt), Honeywell Industrial Automation & Control, Micro Motion Inc., Rosemount Inc., Yokogawa Electric Corporation, SAMSON AG, National Instruments, Yamatake Corporation.

Y entre los mismos se encuentran:

- Medidor de caudal masa, transmisor de presión, transmisor de conductividad y transmisor de concentración, transmisor de pH, ORP, transmisor de temperatura medidor de caudal electromagnético, posicionador de válvula de control, transmisor de presión diferencial, transmisor de nivel tipo radar, transmisor de nivel de diafragma, medidor de caudal ultrasónico, transmisor de presión absoluta, analizador de gas, analizador de oxígeno, cromatógrafo, transmisor de concentración de oxígeno, medidor de caudal masa de Coriolis, convertidor de nivel de diafragma,

convertidor de Fieldbus a corriente, medidor de nivel de radiación, convertidor de Fieldbus a neumático, etc.

Como ejemplo, examinemos alguno de ellos:

- Transmisor de presión que cumple totalmente las especificaciones del protocolo Fieldbus Foundation y dispone de:
  - Bloques de funciones PID y analógico.
  - Linealización polinómica de nivel y caudal.
  - Datos de características electrónicas cargadas vía bus.
  - Compensación de los efectos de cambios de temperatura y presión en el sensor.
  - Compensación de la falta de linealidad del sensor.
  - Dispositivo de configuración de los ajustes del transmisor.
  - Diagnóstico de eventuales averías desde el panel o la sala de control, sin que el operador tenga que desplazarse a campo.
  - Exactitud ± 0,075% en modo analógico y ± 0,05% en modo digital.
- Transmisor de temperatura que cumple totalmente las especificaciones del protocolo Fieldbus Foundation y dispone de:
  - Bloques de funciones PID y analógico, calcula la media, el máximo, el mínimo, la diferencia, etc.
  - Entradas de sondas de resistencia (Pt100, etc.), termopares (J, K, R, S, etc.), ohmios, mV.
  - Linealización de la temperatura.
  - Datos de características electrónicas cargadas vía bus.
  - Dispositivo de configuración que permite configurar los ajustes del transmisor y diagnosticar eventuales averías desde el panel o la sala de control, sin que el operador tenga que desplazarse a campo.
  - Comprobación continua de la resistencia del termopar, a fin de detectar la condición "*burnout*" de rotura del termopar o del cable de compensación, generando una alarma en el panel y/o llevando la indicación de la temperatura al máximo/mínimo de la escala, y/o cambiando al termopar de reserva.
  - Compensación de la unión fría.
  - Protocolos de seguridad CENELEC, CSA, FM.
  - Protección contra transitorios y rayos.
  - Señal de salida 4-20 mA c.c. o digital.
  - Exactitud ± 0,1 °C con sensor de termoresistencia de Pt100.

2.6.3.3 Comparación de tecnologías de transmisión

Es interesante comparar la tecnología convencional analógica y la digital de Fieldbus.

El control electrónico convencional está limitado a la señal 4-20 mA c.c. que es transmitida por dos hilos para cada variable, por lo que esto aumenta el coste del cableado y el coste de la puesta a punto de la instalación, ya que deben comprobarse individualmente cada par de hilos de cada variable.

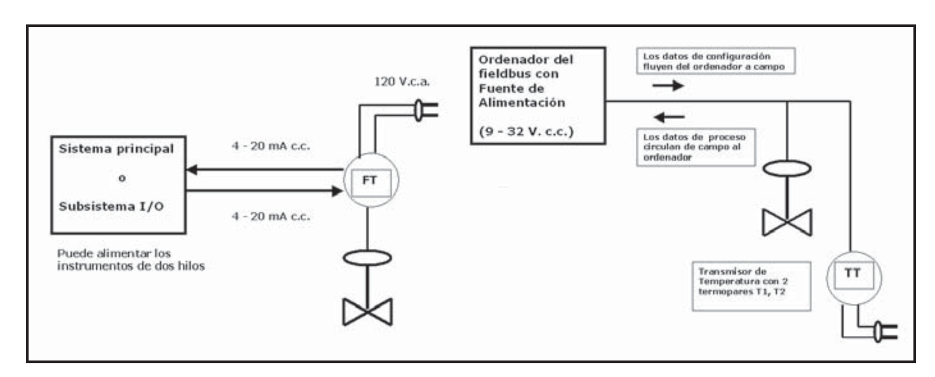


Figura 2.21 Comparación tecnologías convencional analógica y Foundation Fieldbus

La comunicación bidireccional digital permite la carga del software de configuración de los aparatos directamente a través del Fieldbus, con lo que la implantación de las últimas revisiones del estándar se puede efectuar sin desplazarse y sin sustituir el aparato. Asimismo, las comunicaciones digitales eliminan la necesidad de la calibración periódica de la señal analógica de 4-20 mA c.c., y las salidas del transmisor multivariable proporcionan la mejor medida posible de la variable de campo.

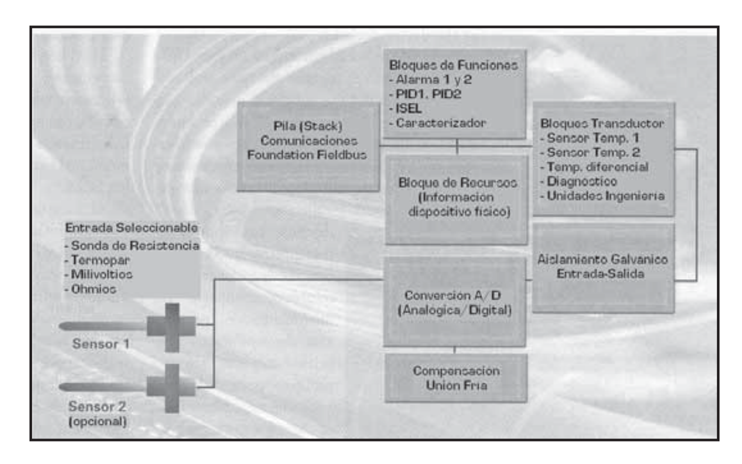


Figura 2.22 Transmisor multivariable de temperatura (FF)

En el *transmisor multivariable*, el bloque de entrada dispone de las temperaturas normal, mínima, máxima, mediana o media. Permite que la temperatura seleccionada sea la primera buena medida de la variable o bien admite la aplicación de otro criterio y, en caso de que falle el sensor 1, transfiere la lectura al sensor 2 y comunica el fallo al ordenador central.

Otro ejemplo de las ventajas de la comunicación bidireccional es la válvula de control con su actuador. Mientras que en el actuador clásico son necesarios más cables y más tarjetas y una labor de puesta a punto importante para averiguar datos adicionales de la válvula, tales como su posición, etc., el estándar FF dispone de bloques que permiten conocer datos de la válvula y su actuador directamente y sin costo adicional.

Otro ejemplo es la medida de caudal con compensación de presión y temperatura, que queda reducida al uso de un único instrumento multivariable.

Los instrumentos FF cumplen la frase ideal de mantenimiento "instalar y olvidar" y, además, informan al proceso de los múltiples datos de la variable, además de permitir el diálogo entre instrumentos (válvula con transmisor, etc.). Las características resumidas y las ventajas de la técnica Foundation Fieldbus (FF) son las siguientes:

- El sistema de comunicaciones es de dos vías, es decir, es posible la lectura del valor de una variable dada por el instrumento y también escribir datos en el instrumento, tales como las constantes de calibración para que queden grabadas en el aparato.
- La extensión de la red Fielbus puede alcanzar típicamente los 2 km, si bien la instalación de repetidores la aumenta hasta una distancia 4 veces mayor.
- Los instrumentos FF potencian el papel de los instrumentos inteligentes, al tener una mejor respuesta dinámica y así pueden proporcionar una exactitud, por ejemplo de 0,000001, lo que permite mejorar la calidad del producto fabricado y reducir el stock de instrumentos y sus recambios. Asimismo, pueden proporcionar información, a través del sistema de control, sobre la calidad de los datos que transmiten (bueno, malo o inseguro), lo que facilita su filtraje para el buen control de la planta.
- Pueden identificar medidas críticas en los instrumentos, por ejemplo válvulas de control y establecer tres niveles de seguridad:
    - Nivel 1: el proceso se para (tarjeta H1 o segmento asignados a cada válvula).
    - Nivel 2: el operador debe intervenir inmediatamente (pocas restricciones).
    - Nivel 3: el operador debe intervenir pero no hay riesgo de paro de la planta (muy pocas restricciones).
- Interoperatibilidad de los instrumentos con certificado Fieldbus.
- Al poder situar los bloques o funciones de control (PID, etc., hasta 32 en número) en el propio instrumento (por ejemplo, transmisor o válvula) de la planta, se consigue un control más fiable con una mayor tolerancia a fallos y, al mismo tiempo, un sistema de control centralizado menos complejo.
- Reducción del volumen de documentos necesarios desde la especificación de los aparatos hasta su mantenimiento.
- Ciclo de vida del proceso mejorado (instalación, servicio y mantenimiento).
- Ahorro del 80-90% del coste de cableado de las instalaciones convencionales, ya que se pueden conectar muchos instrumentos en el mismo hilo del Fieldbus (*multi-drop*). Mientras en el sistema analógico es necesario un par de hilos para cada conexión entre el transmisor y el controlador, en el Fieldbus digital pueden conectarse un número razonable de instrumentos, situados en la misma área de la planta, al mismo cable.
- Ahorro en la configuración y el diagnóstico de averías de los instrumentos. La información adicional disponible permite diagnosticar, a distancia, un problema en la planta, sin necesidad de trasladarse localmente al instrumento. De este modo, el número de viajes a la planta se reduce en un 85%. La calibración en línea permite organizar los procedimientos de calibración de tal modo que el sistema calcula los errores del punto de ensayo, la linealidad, el error de cero, el de *span* y la histéresis. El ensayo de calibración queda registrado de forma gráfica y tabular y se efectúa en un tiempo menor.
- El tiempo de ensayo y de comprobación de lazos de control en la puesta en marcha de la planta se reduce en un 75-80%.

Como en el mercado todavía existen muchos transmisores electrónicos analógicos, el vacío existente entre las dos tecnologías analógica y digital se llena con los estándares híbridos (tal como el protocolo HART). Si bien el coste de los instrumentos de estándar Foundation Fieldbus es actualmente más elevado que los convencionales (un 15% más que los analógicos de 4-20 mA c.c.), sus costes de instalación y puesta a punto son inferiores en un 4%. También es necesario tener en cuenta los beneficios indirectos que proporcionan posteriormente en la planta.

En entornos industriales hostiles, o en la transmisión de señales de proceso a gran distancia, la transmisión por radio es una necesidad. Las señales típicas a transmitir son las presiones relativa y absoluta, temperatura (termopares y sondas de resistencia), nivel, caudal, pH y señales en tensión (0-10 V) o corriente (4-20 mA c.c.). El estándar ISA 100.11a proporciona comunicaciones industriales sin hilos, multifuncionales que pueden manejar miles de aparatos en las plantas y soporta los protocolos de comunicaciones HART, Fieldbus Foundation, Profibus, DeviceNet, etc.

2.7 Tabla comparativa de transmisores

A continuación figura una tabla de comparación de características de los transmisores neumáticos, electrónicos, convencionales e inteligentes. Estos últimos, en las versiones de señal de salida de 4-20 mA c.c. de señal de salida digital y de las características del protocolo Foundation Fieldbus.

Transmisor	Señal	Exactitud
Neumático	3-15 psi, 0,2-1 bar	±0,5%
Electrónico convencional	4-20 mA c.c.	±0,5% - ±0,1%
Electrónico inteligente	4-20 mA c.c.	±0,2%
Digital	Digital	±0,01%

Tabla 2.1 Exactitud de transmisores

Transmisor	Ventajas	Desventajas
Neumático	Rapidez	Aire limpio, sencillo, no guarda información Distancias limitadas, mantenimiento caro Sensible a vibraciones
Electrónico convencional	Rapidez	Sensible a vibraciones y ruidos eléctricos Derivas térmicas
Electrónico Inteligente 4-20 mA c.c.	Mayor exactitud Intercambiable Estable, fiable Campo medida más amplio Bajo coste mantenimiento	Lento (para variables rápidas puede dar problemas)
Electrónico Inteligente señal digital	Mayor exactitud Más estabilidad Fiable, autodiagnóstico Comunicaciones bidireccionales Configuración remota Campo medida mas amplio Bajo coste mantenimiento Inmunidad a ruidos eléctricos Menor nº de instrumentos en stock para recambios	Lento (para variables rápidas puede dar problemas) Coste más alto de los instrumentos

Tabla 2.2 Ventajas y desventajas de transmisores

Sistema de datos H1	
Máx. nº de aparatos	240 nodos/segmento
Máx. velocidad de muestreo en baudios	31,25 Kbps
Máx. longitud	1.900 m a 31,25 Kbps
Medio físico	Par torsionado, fibra óptica
Topología del circuito	Árbol o estrella, bus
Abierto a	Productos Chip y software de múltiples vendedores
Máx. envío de datos I/O	128 bytes
Conexión I/O	Cíclico
Comunicaciones	Cliente/servidor, fabricante/subscriptor, notificación de eventos
Sistema de datos H2, a través de Ethernet de alta velocidad	
Máx. nº de aparatos	Dirección IP, que puede soportar nodos ilimitados
Máx. velocidad de muestreo en baudios	100 Mbps
Máx. longitud	100 m @ 100Mbps con par torsionado, 2000m @ 100Mbps con fibra óptica
Medio físico	Par torsionado, fibra óptica
Topología del circuito	Árbol o estrella
Abierto a	Muchos fabricantes de componentes
Máx. envío de datos I/O	Varía, utiliza el estándar TCP/IP
Conexión I/O	Cíclico
Comunicaciones	Cliente/servidor, fabricante/subscriptor, notificación de eventos

Tabla 2.3 Características Foundation Fieldbus



Capítulo 3
Medidas de presión

3.1 Unidades y clases de presión

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmósferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada). En el Sistema Internacional (S.I.) está normalizada en pascal de acuerdo con las Conferencias Generales de Pesas y Medidas 13 y 14, que tuvieron lugar en París en octubre de 1967 y 1971, y según la Recomendación Internacional número 17, ratificada en la III Conferencia General de la Organización Internacional de Metrología Legal. El pascal es 1 newton por metro cuadrado (1 N/m^2), siendo el newton la fuerza que aplicada a un cuerpo de masa 1 kg le comunica una aceleración de 1 m/s^2. Como el pascal es una unidad muy pequeña, se emplean también el kilopascal (1 kPa = 10^{-2} bar), el megapascal (1 MPa = 10 bar) y el gigapascal (1 GPa = 10.000 bar). En la industria se utiliza también el bar (1 bar = 10^5 Pa = 1,02 kg/cm^2) y el kg/cm^2, si bien esta última unidad, a pesar de su uso todavía muy extendido, se emplea cada vez con menos frecuencia, en particular en nuevas plantas.

	Psi	*Pulgada c. de agua*	*Pulgada c. de Hg*	*Atmósfera*	*kg/cm²*	*cm c. de a.*	*mm c. de Hg*	*Bar*	*Pa*
Psi	1	27,68	2,036	0,0680	0,0703	70,31	51,72	0,0689	6894,76
Pulgada c. de a.	0,0361	1	0,0735	0,0024	0,0025	2,540	1,868	0,0024	249
Pulgada c. de Hg	0,4912	13,6	1	0,0334	0,0345	34,53	25,4	0,0338	3386,39
Atmósfera	14,7	406,79	29,92	1	1,033	1033	760	1,0132	$1,0133 \times 10^5$
kg/cm^2	14,22	393,7	28,96	0,9678	1	1000	735,6	0,98	98066
cm c. de a.	0,0142	0,3937	0,0289	0,00096	0,0010	1	0,7355	0,0009	98,06
mm c. de Hg	0,0193	0,5353	0,0393	0,0013	0,0013	1,359	1	0,00133	133,322
Bar	14,5	401	29,53	0,987	1,02	1020	750	1	10^5
Pa	0,00014	0,0040	0,00029	$0,987 \times 10^{-5}$	$0,102 \times 10^{-4}$	0,01	0,0075	10^{-5}	1

Tabla 3.1 Unidades de presión

En la tabla 3.1 figuran las equivalencias entre estas unidades. En la figura 3.1 se representan los instrumentos de presión, vacío y su campo de aplicación.

En la figura 3.2 se indican las clases de presión absoluta o diferencial que los instrumentos miden comúnmente en la industria.

- *Presión absoluta* que se mide con relación al cero absoluto de presión (puntos A y A' de la figura).
- *Presión atmosférica* es la presión ejercida por la atmósfera terrestre medida mediante un barómetro. A nivel del mar, esta presión es próxima a 760 mm (29,9 pulgadas) de mercurio absolu-

tos o 14,7 psia (libras por pulgada cuadrada absolutas) o bien 1,01325 bar o 1,03322 Kg/cm^2 y estos valores definen la presión ejercida por la atmósfera estándar.

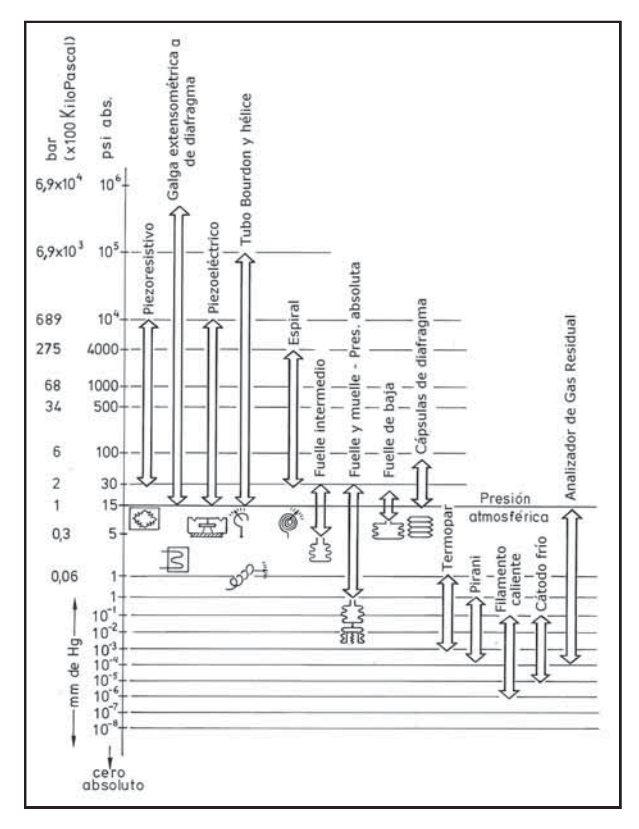


Figura 3.1 Instrumentos de presión y campo de aplicación

- *Presión relativa*, que es la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica del lugar donde se realiza la medición (punto B de la figura). Hay que señalar que al aumentar o disminuir la presión atmosférica, disminuye o aumenta respectivamente la presión leída (puntos B' y B''), si bien ello es despreciable al medir presiones elevadas.
- *Presión diferencial* es la diferencia entre dos presiones, puntos C y C'.
- *Vacío* es la diferencia de presiones entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta, es decir, es la presión medida por debajo de la atmosférica (puntos D, D' y D"). Viene expresado en mm columna de mercurio, mm columna de agua o pulgadas de columna de agua. Las variaciones de la presión atmosférica influyen considerablemente en las lecturas del vacío.

3.2 Elementos mecánicos

Podemos dividirlos en elementos primarios de medida directa que miden la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocidas (barómetro cubeta, manómetro de tubo en U, manómetro de tubo inclinado, manómetro de toro pendular, manómetro de campana) y en elementos primarios elásticos que se deforman con la presión interna del fluido que contienen.

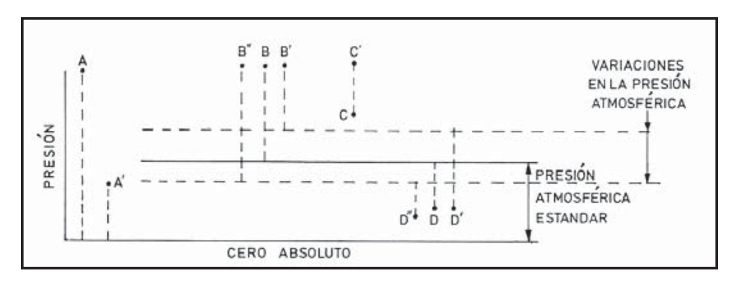


Figura 3.2 Clases de presión

Los elementos primarios elásticos más empleados son el tubo de Bourdon, el elemento en espiral, el helicoidal, el diafragma y el fuelle.

Los materiales empleados normalmente son acero inoxidable, aleación de cobre o níquel o aleaciones especiales como hastelloy y monel.

El *tubo de Bourdon* es un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, éste tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, por un sector dentado y un piñón.

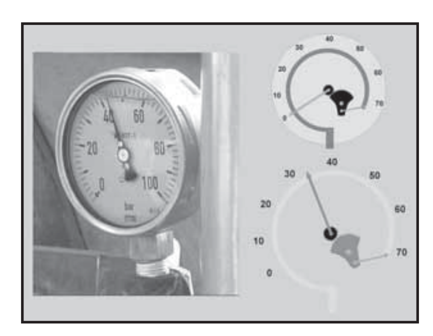


Figura 3.3 Tubo Bourdon

El *elemento en espiral* se forma arrollando el tubo Bourdon en forma de espiral alrededor de un eje común, y el helicoidal arrollando más de una espira en forma de hélice. Estos elementos proporcionan un desplazamiento grande del extremo libre y, por ello, son ideales para los registradores.

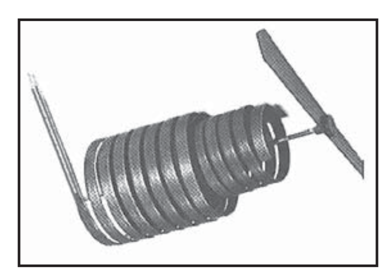


Figura 3.4 Elemento en espiral

El *diafragma* consiste en una o varias cápsulas circulares conectadas rígidamente entre sí por soldadura, de forma que al aplicar presión, cada cápsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos es amplificada por un juego de palancas. El sistema se proyecta de tal modo que, al

aplicar presión, el movimiento se aproxima a una relación lineal en un intervalo de medida lo más amplio posible con un mínimo de histéresis y de desviación permanente en el cero del instrumento.

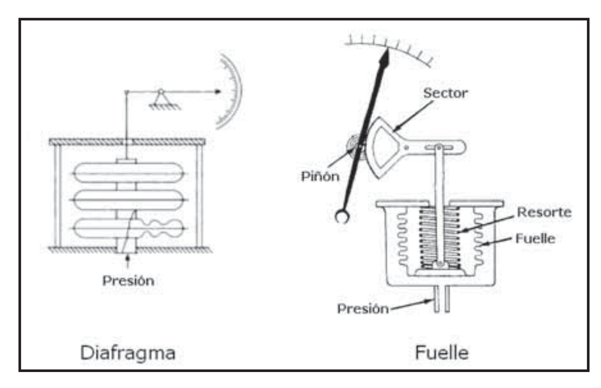


Figura 3.5 *Diafragma y fuelle*

El *fuelle* es parecido al diafragma compuesto, pero de una sola pieza flexible axialmente, y puede dilatarse o contraerse con un desplazamiento considerable.

Los *elementos primarios de presión absoluta* consisten en un conjunto de fuelle y muelle opuesto a un fuelle sellado al vacío absoluto. El movimiento resultante de la unión de los dos fuelles equivale a la presión absoluta del fluido. El material empleado para los fuelles es latón o acero inoxidable. Se utilizan para la medida exacta y el control preciso de bajas presiones, a las que puedan afectar las variaciones en la presión atmosférica.

Por ejemplo, en el caso de emplear un vacuómetro para el mantenimiento de una presión absoluta de 50 mm de mercurio en una columna de destilación, el punto de consigna sería de 710 mm, con una presión atmosférica de 760 mm. Si la presión atmosférica cambiase a 775 mm, el vacuómetro indicaría: 710 + 15 = 725 mm, con lo cual la presión absoluta en la columna sería controlada a 50 + 15 = 65 mm, es decir, a un 30% más de la deseada.

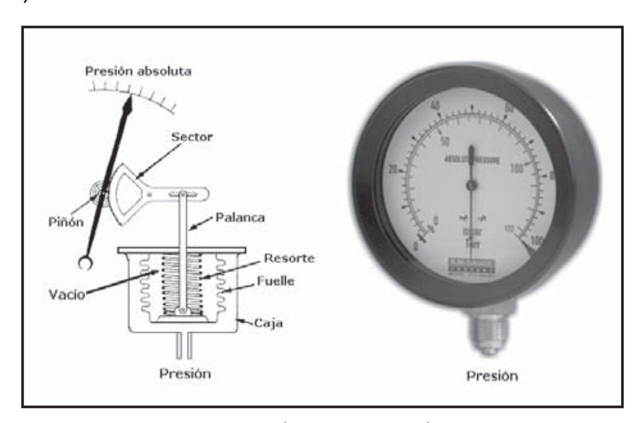


Figura 3.6 *Manómetro de presión absoluta*

A señalar que los restantes elementos de presión descritos anteriormente (Bourdon, espiral, diafragma, fuelle) miden la presión relativa, ya que la presión del fluido se encuentra dentro del elemento, mientras que en el exterior actúa la presión atmosférica.

En la medida de presiones de fluidos corrosivos pueden emplearse elementos primarios elásticos con materiales especiales en contacto directo con el fluido. Sin embargo, en la mayoría de los casos, es más económico utilizar un fluido de sello de diafragma (glicerina o silicona), que llena totalmente la conexión de proceso del instrumento, cuando el fluido es altamente viscoso y obtura el elemento (tubo Bourdon, por ejemplo), o bien, cuando la temperatura del proceso es demasiado alta. Esto ocurre en la medición de presión del vapor de agua en que el agua condensada aísla el tubo Bourdon de la alta temperatura del vapor. Asimismo, se emplean sellos volumétricos de diafragma y de fuelle que contienen un líquido incompresible para la transmisión de la presión. Una rotura con escape del líquido de sello inhabilita el instrumento.

Los instrumentos de presión deben estar aislados con una válvula de cierre para su desmontaje del proceso. Cuando la presión del proceso supera los 25 bar se necesita otra válvula de alivio para evitar un posible accidente en el desmontaje del aparato. De este modo, el operario primero cierra la válvula de aislamiento y abre, a continuación, la válvula de alivio para liberar la presión dentro de la toma interna de presión del aparato. Si no procediera así, el fluido podría accidentar al operario, al darle directamente en la cara al desenroscar el instrumento.

El recorrido de la tubería de instalación debe hacerse siguiendo una inclinación hacia arriba si el fluido es un gas (posibles condensaciones de humedad o vapores) y hacia abajo si es un líquido (para la eliminación de burbujas de aire).

En los casos en que la temperatura es alta, tal como la medida de presión de vapor de agua con un manómetro, es más barato utilizar una lira (*pigtail*) que enfría el vapor y lo condensa, utilizando así el agua como fluido de sello. Si el fluido no condensa, basta una longitud de tubería relativamente larga para enfriarlo (el fluido no circula, por lo que la tubería no debe ser tampoco excesivamente larga). Longitudes mayores de 25 m requieren el uso de un transmisor.

Si la temperatura del proceso es superior a los límites tolerados por el instrumento, se prevé una longitud de tubería suficiente sin aislar ni tracear, para bajar (o elevar) la temperatura a límites aceptables. Normalmente, una longitud de tubería de ½" sin aislar de 75 a 100 cm, es suficiente para bajar la temperatura desde unos 500 °C a menos de 100 °C.

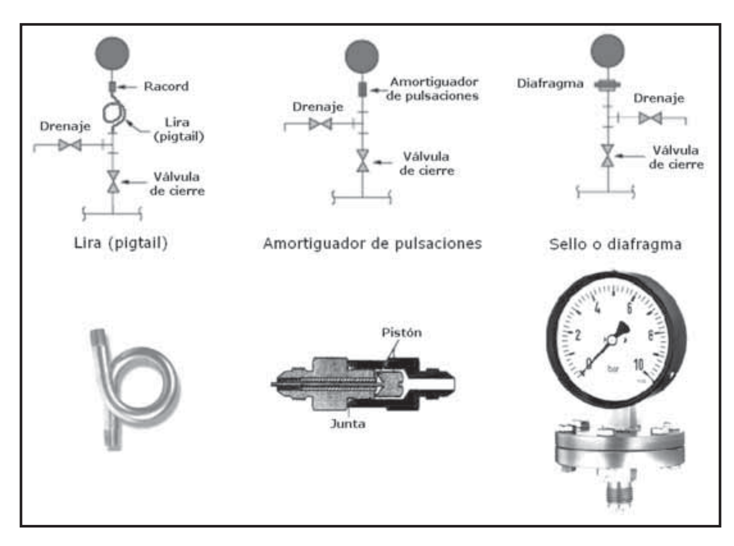


Figura 3.7 Accesorios del tubo Bourdon (lira, amortiguador, diafragma)

Los tubos capilares de los separadores de diafragma deben instalarse cuidadosamente, aislados de cualquier fuente variable de calor (tuberías de traceado de vapor o proceso, etc.) y protegidos mecánicamente en bandejas.

Después de la instalación debe comprobarse si es significativo el error debido a la columna hidrostática entre la toma de proceso y el instrumento y efectuar, en su caso, la correspondiente corrección sobre el cero. En los transmisores esta corrección se realiza con la supresión o elevación de cero.

Si se conoce o se supone la existencia de vibraciones o pulsaciones (por ejemplo tuberías cercanas a máquinas alternativas, bombas dosificadoras, etc.) se preverán, en fase de proyecto, manómetros con amortiguadores o, como alternativa, manómetros especialmente diseñados para estos servicios. En algunos casos puede utilizarse el relleno de glicerina para la protección de vibraciones o pulsaciones del proceso. Si hay transmisión de vibraciones de alguna máquina o equipo, podrán utilizarse latiguillos flexibles.

En general, los instrumentos de presión se conectan al proceso después de que las líneas han sido perfectamente lavadas y probadas hidrostáticamente.

En la tabla 3.2 figura un resumen de los distintos elementos mecánicos de presión.

	Campo de medida	*Exactitud en % de toda la escala*	*Temperatura máxima de servicio*	*Presión estática máxima*
Barómetro cubeta	0,1-3 m cda	0,5-1 %	Ambiente	6 bar
Tubo en U	0,2-1,2 m cda	0,5-1 %		10 bar
Tubo inclinado	0,01-1,2 m cda			↓
Toro pendular	0,5-10 m cda			100-600 bar
Manómetro campana	0,005-1 m cda		↓	Atmosférica
Tubo Bourdon	0,5-6000 bar		90° C	6000 bar
Espiral	0,5-2500 bar			2500 bar
Helicoidal	0,5-5000 bar			5000 bar
Diafragma	50 mm cda-2 bar			2 bar
Fuelle	100 mm cda-2 bar	↓	↓	↓
Presión absoluta	6-760 mm Hg abs	1 %	Ambiente	Atmosférica
Sello volumétrico	3-600 bar	0,5-1 %	400° C	600 bar

Tabla 3.2 Elementos mecánicos de presión

3.3 Elementos electromecánicos

Los *elementos electromecánicos de presión* utilizan un elemento mecánico combinado con un transductor eléctrico, que genera la correspondiente señal eléctrica. El elemento mecánico consiste en un tubo Bourdon, espiral, hélice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos que a través de un sistema de palancas convierte la presión en una fuerza o en un desplazamiento mecánico.

Los elementos electromecánicos se clasifican según el principio de funcionamiento en los siguientes tipos: resistivos, magnéticos, capacitivos, extensométricos y piezoeléctricos.

Los elementos *resistivos* están constituidos de un elemento elástico (tipo Bourdon o cápsula) que varía la resistencia óhmica de un potenciómetro en función de la presión. El potenciómetro puede adoptar la forma de un sólo hilo continuo, o bien estar arrollado a una bobina siguiendo un valor lineal o no de resistencia.

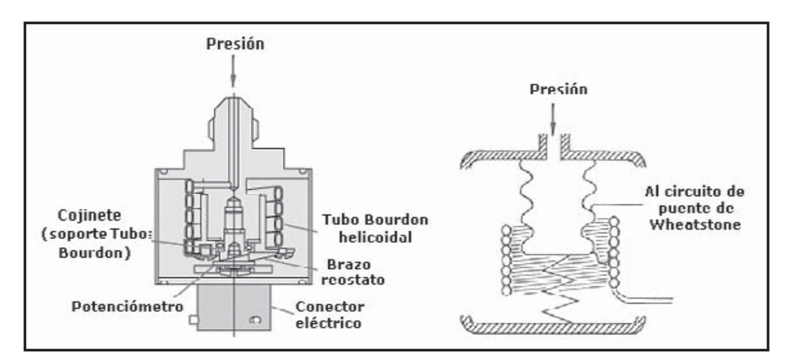


Figura 3.8 Elemento resistivo

El movimiento del elemento de presión se transmite a un brazo móvil aislado que se apoya sobre el potenciómetro de precisión. Éste está conectado a un circuito de puente de Wheatstone.

Los elementos de *inductancia variable* utilizan el transformador diferencial variable lineal (LVDT = *Linear Variable Diferencial Transformer*) que proporciona una señal en c.a. proporcional al movimiento de una armadura de material magnético situada dentro de un imán permanente o una bobina que crea un campo magnético. Al cambiar la posición de la armadura, por un cambio en la presión del proceso, varía el flujo magnético. Esta variación del flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina que es, por tanto, proporcional al grado de desplazamiento de la armadura móvil.

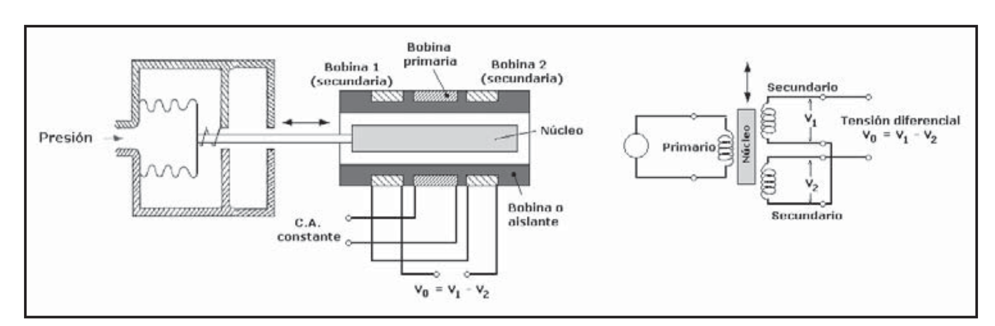


Figura 3.9 Transductor de inductancia variable con transformador diferencial variable lineal (LVDT)

Los elementos de *reluctancia variable* se basan en el desplazamiento mecánico, debido a la presión, de un núcleo magnético situado en el interior de una o dos bobinas. Estas bobinas están conectadas a un puente de c.a. y la tensión de salida es proporcional a la presión del fluido. El sensor está conectado a un puente alimentado por una tensión alterna de frecuencias entre 1 KHz a 10 KHz. La variación de la reluctancia magnética produce una modulación de inductancia efectiva que es función de la presión del fluido.

Los elementos *capacitivos* se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión. La placa móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas.

De este modo, se tienen dos condensadores uno de capacidad fija o de referencia y el otro de capacidad variable, que pueden compararse en circuitos oscilantes o bien en circuitos de puente de Wheatstone alimentados con corriente alterna.

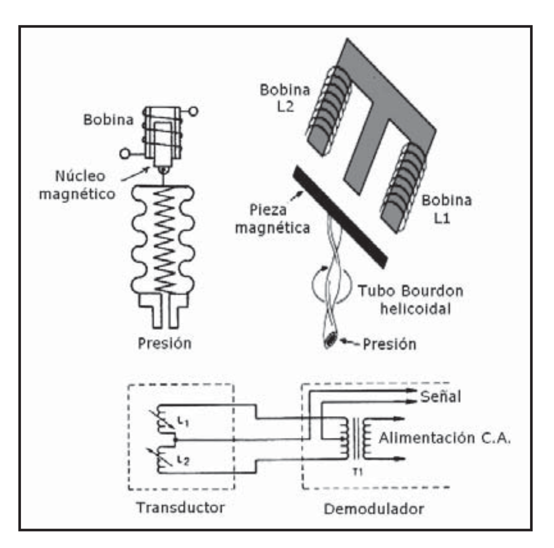


Figura 3.10 Transductor de reluctancia variable

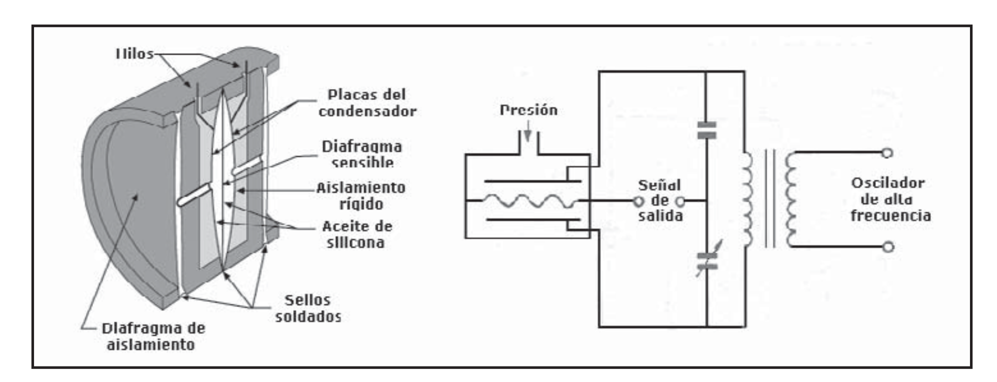


Figura 3.11 Transductor capacitivo

Los elementos de *galgas extensiométricas* se basan en la variación de longitud y de diámetro, y por lo tanto de resistencia, que tiene lugar cuando un hilo de resistencia se encuentra sometido a una tensión mecánica por la acción de una presión.

Existen dos tipos de galgas extensiométricas, *galgas cementadas*, formadas por varios bucles de hilo muy fino que están pegados a una hoja base de cerámica, papel o plástico, y *galgas sin cementar*, donde los hilos de resistencia descansan entre un armazón fijo y otro móvil bajo una ligera tensión inicial.

La aplicación de presión estira o comprime los hilos, según sea la disposición que el fabricante haya adoptado, modificando la resistencia de los mismos.

Las galgas extensiométricas tienen una respuesta frecuencial excelente y pueden utilizarse en medidas estáticas y dinámicas. No son influidas por campos magnéticos, pero presentan una señal de salida débil, son muy sensibles a vibraciones y tienen una estabilidad dudosa a lo largo del tiempo de funcionamiento.

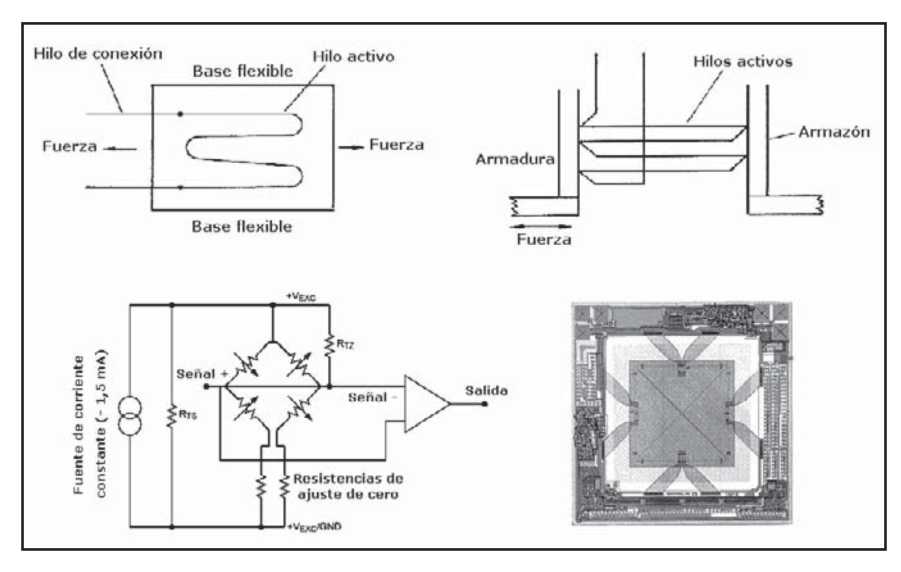


Figura 3.12 Galgas extensiométricas

Una innovación de la galga extensiométrica la constituyen los *elementos de presión de silicio difundido*. Están formados por un elemento de silicio situado dentro de una cámara conteniendo silicona que está en contacto con el proceso a través de un diafragma flexible. El sensor está fabricado a partir de un monocristal de silicio, en cuyo seno se difunde boro para formar varios puentes de Wheatstone, constituyendo así una galga extensiométrica autocontenida. Se montan en partes del instrumento protegidas contra agresiones exteriores, de tal modo que los instrumentos que las contienen, principalmente transmisores, son muy robustos y pueden trabajar durante largos períodos de tiempo sin prácticamente mantenimiento. Están unidos a aparatos digitales con microprocesador, lo que permite funciones diversas, tales como la selección de las unidades de ingeniería, autodiagnóstico, linealización perfecta de la señal de salida, sin que sean necesarias las operaciones periódicas de calibración, típicas de los instrumentos analógicos convencionales.

Los elementos *piezoeléctricos* son materiales cristalinos que, al deformarse físicamente por la acción de una presión, generan un potencial eléctrico. Dos materiales típicos en los transductores piezoeléctricos son el cuarzo y el titanato de bario, capaces de soportar temperaturas del orden de 150 °C en servicio continuo y de 230 °C en servicio intermitente.

Son elementos ligeros, de pequeño tamaño y de construcción robusta. Su señal de respuesta a una variación de presión es lineal y son adecuados para medidas dinámicas, al ser capaces de respuestas frecuenciales de hasta un millón de ciclos por segundo. Tienen la desventaja de ser sensibles a los cambios en la temperatura y de experimentar deriva en el cero y precisar ajuste de impedancias en caso de fuerte choque. Asimismo, su señal de salida es relativamente débil, por lo que precisan de amplificadores y acondicionadores de señal que pueden introducir errores en la medición.

Los elementos de *película delgada* son sensores piezoresistivos, adecuados para presiones superiores a 25 bar, que consisten en membranas cubiertas con una capa de resistencia, cuyo valor cambia con la aplicación de presión. La membrana de acero inoxidable contiene una capa de aislamiento de SiO_2 de un espesor de 4-6 mm. Sobre dicha capa de resistencia y mediante un proceso fotolitográfico se cauterizan las bandas extensiométricas y se van depositando otras capas, todo ello

utilizando la tecnología de película delgada. La deformación de la membrana es mínima, del orden de micras, por lo que posee buenas características dinámicas. Las bandas en número de cuatro se conectan a un puente de Wheatstone.

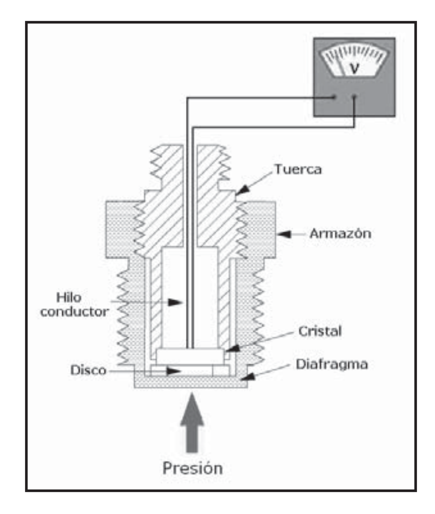


Figura 3.13 Elemento piezoeléctrico

En la tabla 3.3 pueden verse las características de los elementos electromecánicos descritos.

	Margen en bar	Exactitud en % de toda la escala	Estabilidad en el tiempo	Sobrecarga	Temp. máx. de servicio °C	Nivel señal salida	Impedancia salida	Error de cero por influencia temperat. ambiente	Resolución	Sensibilidad a vibraciones
Equilibrio de fuerzas	2-6000	0,5	Media a mala	150 %	65	10 V	600 Ω	0,9-2,3 %	Continua	Alta
Resistivos	0-0,1 a 0-300	1	Mala	150 %	80	Variac. res.	0-Res. total	0,7-3 %	0,25 %	↓
Magnéticos – Inductancia variable	↓	0,5	Media	150 %	↓	0-5 V	2 kΩ	0,9-2,3 %	Continua	↓
Magnéticos – Reluctancia variable	↓	1	Media	150 %	↓	0-5 V	2 kΩ	0,6-2,4 %	↓	↓
Capacitivos	0,05-5 a 0,05-600	1	Media a buena	150 %	150	↓	5 kΩ	0,5-1,9 %	↓	Media
Galgas extensométricas – Cementadas	0-0,5 a 0-3000	0,5	Mala	↓	120	35 mV	350 Ω	0,5-2,4 %	↓	Alta
Galgas extensométricas – Sin cementar	0-0,01 a 0-600	1	Mala	200 %	↓	↓	350 Ω	↓	↓	↓
Galgas extensométricas – Piezoresistivo	0-2 a 0-600	0,3	Muy buena	200 %	107	2-10 V	600 Ω	0,4-1 %	↓	Despreciable
Piezoeléctricos	0,1-600	1	Mala	↓	90	600 mV/bar	1000 MΩ	1-4,8 %	1/5000	Baja

Tabla 3.3 Características elementos electromecánicos

3.4 Elementos electrónicos de vacío

Los elementos electrónicos de vacío se emplean para la medida de alto vacío, son muy sensibles y se clasifican en los siguientes tipos:

- Medidor McLeod.
- Mecánicos – Tubo Bourdon, fuelle y diafragma.

- Propiedades de un gas – Conductividad térmica.
- Térmicos – Termopar, Pirani, bimetal.
- Ionización – Filamento caliente, cátodo frío.

En la figura 3.14 pueden verse los campos de trabajo de los elementos electrónicos de vacío.

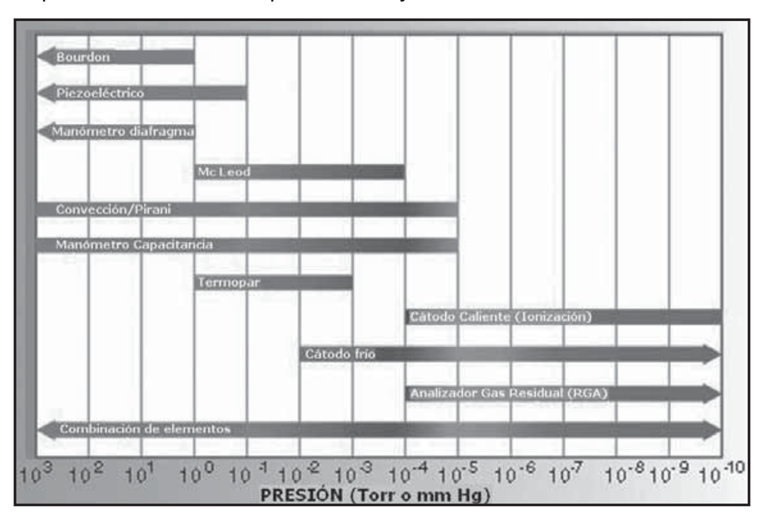


Figura 3.14 Campos de trabajo de los elementos electrónicos de vacío. Fuente: Kurt J. Lesker

El *medidor McLeod* se utiliza como aparato primario de calibración de los restantes instrumentos. Se basa en comprimir una muestra del gas de gran volumen conocido a un volumen más pequeño y a mayor presión mediante una columna de mercurio en un tubo capilar de volumen conocido. La presión del gas se deduce aplicando la ley de Boyle-Mariotte. Su intervalo de medida es de 1 a 10^{-4} mm Hg. Debido a la compresión que se realiza en la medida no puede utilizarse para vapores.



Figura 3.15 Medidor McLeod

El tubo Bourdon combina la medida de presión y vacío con la escala dividida en dos partes, a la izquierda el vacío (cm de Hg y puldadas de mercurio) y a la derecha Kg/cm^2 (bar) y psi.

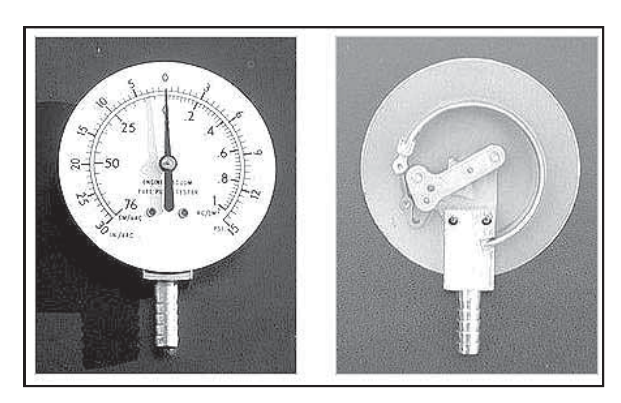


Figura 3.16 *Tubo Bourdon de medida de presión y vacío. Fuente: Wikipedia*

Los *elementos mecánicos de fuelle y de diafragma* trabajan en forma diferencial entre la presión atmosférica y la del proceso. Pueden estar compensados con relación a la presión atmosférica y calibrados en unidades absolutas. Al ser dispositivos mecánicos, las fuerzas disponibles a presiones del gas muy bajas son tan pequeñas que estos instrumentos no son adecuados para la medida de alto vacío, estando limitados a valores de 0,00001 mm Hg abs. Pueden llevar acoplados elementos eléctricos del tipo de galga extensiométrica o capacitivos. En la figura 3.17 puede verse un medidor de vacío de capacitancia con diafragma

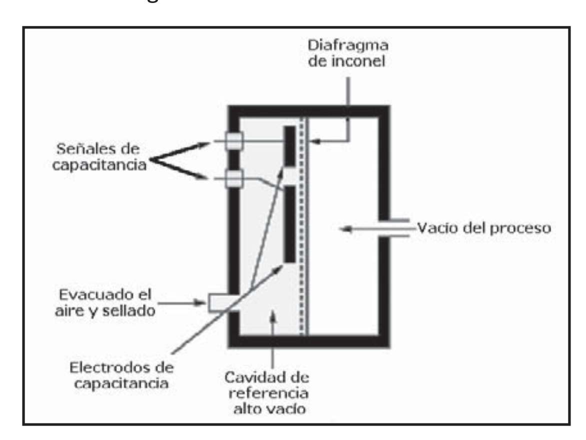


Figura 3.17 *Medidor de vacío de capacitancia con diafragma*

Los aparatos basados en las propiedades de un gas miden la conductividad térmica o la viscosidad. Estos parámetros varían de forma no lineal con la presión y dependen de la composición del gas, por lo que son inexactos. Trabajan entre 100 mm Hg abs y 0,0001 mm Hg abs.

Los *elementos térmicos* se basan en el principio de la proporcionalidad entre la energía disipada desde la superficie caliente de un filamento calentado por una corriente constante y la presión del gas ambiente cuando el gas está a bajas presiones absolutas. Son el elemento térmico de termopar, el elemento Pirani y el elemento bimetálico.

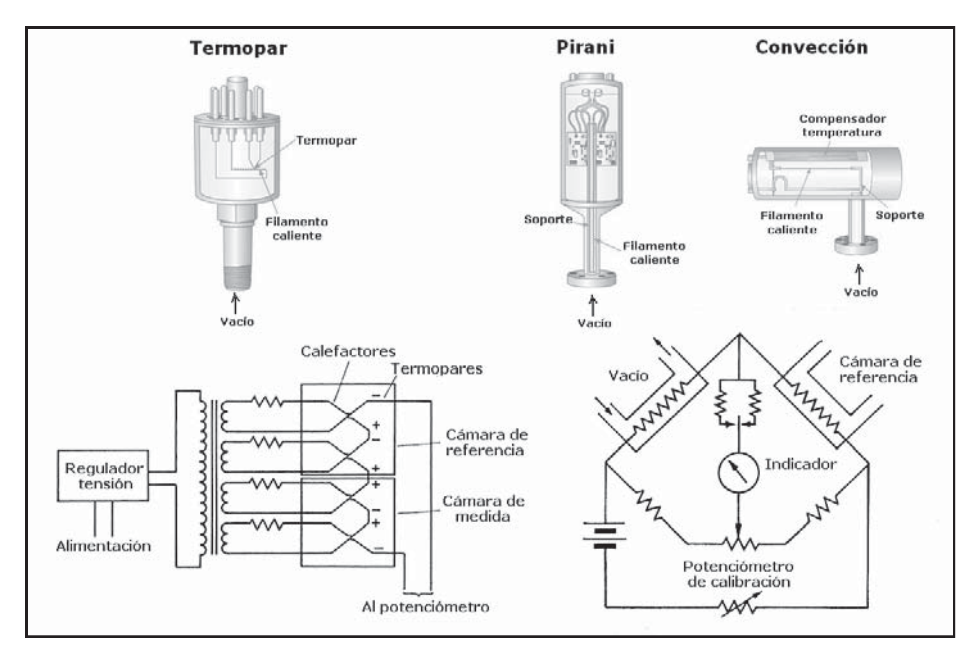


Figura 3.18 Transductores térmicos

El elemento de termopar mide presiones entre 10 mm Hg y 0,001 mm Hg mediante la medición de las tensiones generadas en una serie de termopares soldados a un filamento caliente expuesto al gas. El filamento alcanza una temperatura de equilibrio que viene determinada por la cantidad de energía extraída del gas. A presiones más altas, más moléculas del gas chocan contra el filamento y extraen más energía que a bajas temperaturas, con lo cual aumenta la f.e.m. del termopar.

En el elemento *Pirani*, dos filamentos de platino (referencia y medida) forman parte de dos brazos de un puente de Wheatstone. El filamento de referencia está inmerso en un gas conocido a presión constante, mientras que el filamento de medida está expuesto al gas a valorar. Los filamentos se calientan a través del puente y se mantienen a una temperatura constante. Las moléculas del gas que chocan contra el elemento de medida extraen energía que es detectada y sustituida por el circuito de realimentación. Cubren el intervalo de presiones de 10 mm Hg a 10^{-5} mm Hg.

El elemento de convección tiene la misma estructura que el de termopar o el Pirani, con la diferencia de que la convección natural de los gases extrae el calor del filamento caliente. Intervalo de medida de 10 mm Hg a 1 atmósfera.

Los elementos de *ionización* se basan en la formación de los iones que se producen en las colisiones que existen entre moléculas y electrones (o bien partículas alfa en el tipo de radiación). La velocidad de formación de estos iones, es decir la corriente iónica, varía directamente con la presión. Los forman el elemento de filamento caliente y el elemento de cátodo frío. Cubren el intervalo desde 10^{-4} y 10^{-9} mm Hg abs.

Los elementos de cátodo (filamento) caliente (*Bayard/Alpert (B-A) and Schulz-Phelps (S-P)*) emiten electrones termoiónicos de 70 eV que ionizan las moléculas de gas residual contra las que chocan. La corriente al colector (-150 V) varía con la densidad del gas, es decir con el número de moléculas por unidad de volumen (cc), lo que es una medida directa de la presión del gas.

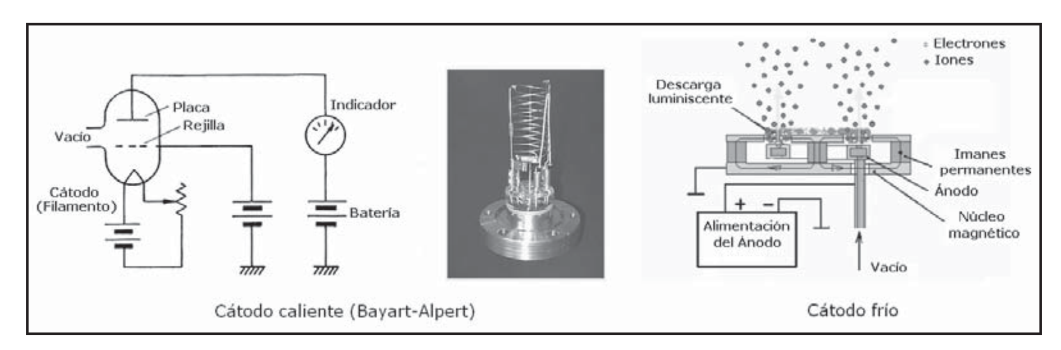


Figura 3.19 *Elementos de ionización (Filamento caliente y Cátodo frío)*

Los elementos de cátodo (filamento) frío están basados en una descarga mantenida por un campo magnético externo que fuerza a los electrones a seguir una trayectoria en hélice con una alta probabilidad de ionizar el gas residual. El número de iones captados determina la presión del gas. Uno de los modelos es el llamado magnetrón invertido que puede medir de 1 a 10^{-11} mm Hg abs, si bien, su puesta en marcha a baja presión puede ser de horas o días.

Analizadores de gas residual son espectrómetros especiales de masa que se sitúan en una cámara al vacío y que trabajan en el valor de 10^{-4} mm Hg abs.

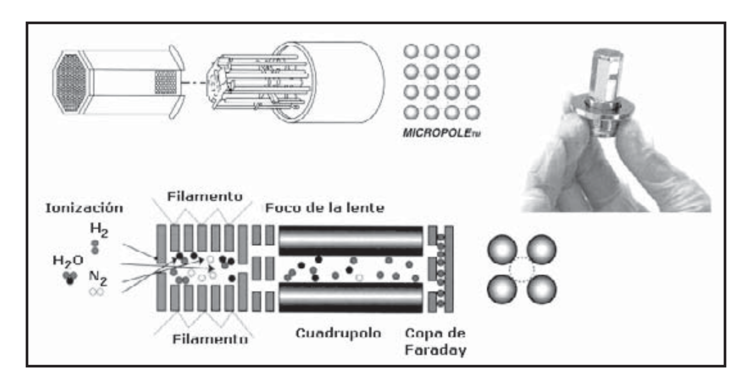


Figura 3.20 *Analizador de gas residual. Fuente: HORIBA STEC*

Los detectores de fugas son espectrómetros de masas que detectan concentraciones extremadamente pequeñas de helio en presencia de grandes cantidades de otros gases. Pueden captar fugas tan pequeñas como 10^{-10} Ncc/seg.

		Margen (torrs)	*Escala*	*Exactitud*
Mecánicos		760 - 5	Lineal	1 %
McLeod		5 - 10^{-5}	↓	1 - 10 % lectura
Térmicos	Termopar	0,5 - 10^{-3}	Logarítmica	Alta
	Pirani	2 - 10^{-3}		—
	Bimetal	1 - 10^{-3}		—
Ionización	Filamento caliente	10^{-3} - 10^{-13}		—
	Cátodo frío	10^{-2} - 10^{-7}	↓	

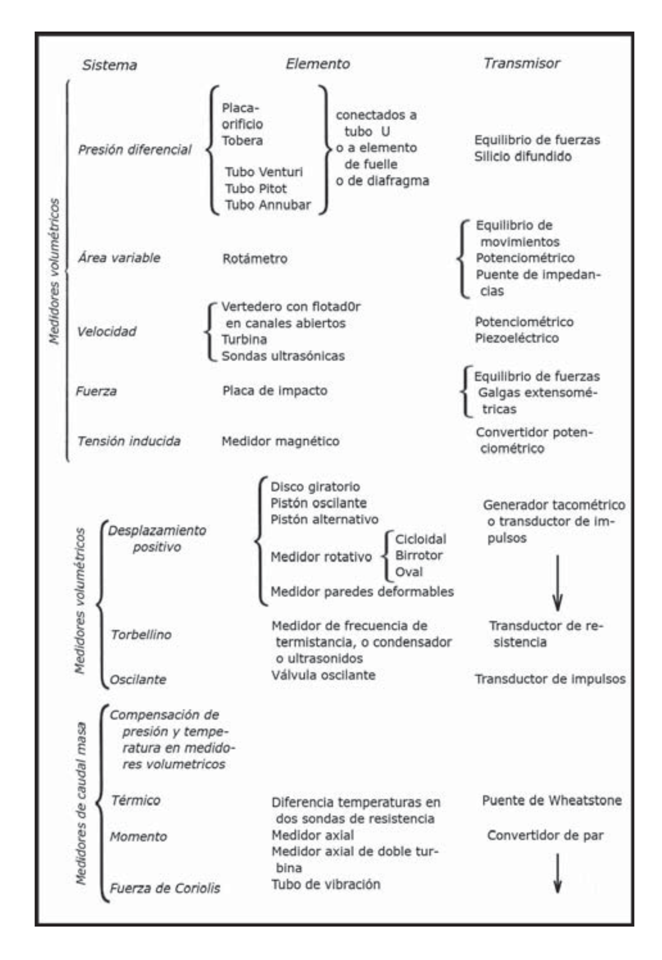
Tabla 3.4 Características de los elementos de vacío

Capítulo 4
Medidas de caudal

En la mayor parte de las operaciones realizadas en los procesos industriales y en las efectuadas en laboratorio y en plantas piloto es muy importante la medición de caudales de líquidos y gases.

Existen dos tipos de medidores, los volumétricos que determinan el caudal en volumen del fluido, y los de masa que determinan el caudal masa. Se reservan los medidores volumétricos para la medida general de caudal y se destinan los medidores de caudal másico a aquellas aplicaciones en las que la exactitud de la medida es importante, por ejemplo en las determinaciones finales del caudal del producto para su facturación.

Los principios de medida de los medidores de caudal son:



4.1 Medidores volumétricos

Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen de fluido, bien sea directamente (desplazamiento), bien indirectamente por deducción o inferencia (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida, torbellino).

Es necesario señalar que la medida de caudal volumétrico en la industria se lleva a cabo principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido. Entre estos elementos se encuentran la placa orificio o diafragma, la tobera, el tubo Venturi, el tubo Pitot y el tubo Annubar.

4.1.1 Instrumentos de presión diferencial

4.1.1.1 Fórmula general

Los elementos de presión diferencial se basan en la diferencia de presiones provocada por un estrechamiento en la tubería por donde circula el fluido (líquido, gas o vapor). La presión diferencial provocada por el estrechamiento es captada por dos tomas de presión situadas inmediatamente aguas arriba y aguas abajo del mismo, o bien a una corta distancia. Su valor es mayor que la pérdida de carga real que debe compensar el sistema de bombeo del fluido.

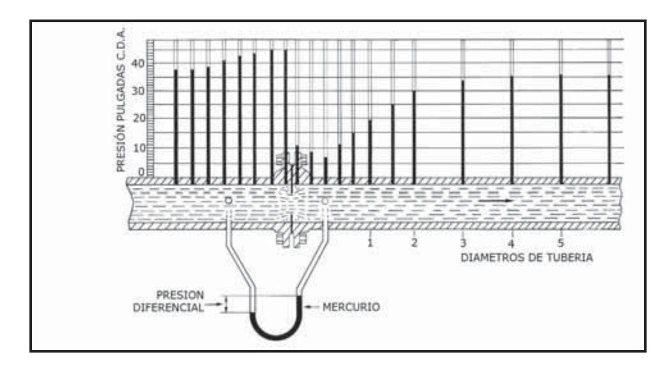


Figura 4.1 Presión diferencial creada por la placa orificio

La fórmula de caudal obtenida con los elementos de presión diferencial se basa en la aplicación del teorema de Bernouilli (altura cinética + altura de presión + altura potencial = constante) a una tubería horizontal (figura 4.2).

Sean P_a, P_c y V_a, V_c las presiones absolutas y velocidades en la zona anterior a la placa donde el fluido llena todo el conducto y en la vena contraída, respectivamente, y S_a, S_c las secciones correspondientes, resulta:

$$\frac{V_a^2}{2} + \frac{P_a}{\rho_0} = \frac{V_c^2}{2} + \frac{P_c}{\rho_0}$$

y:

$$S_a V_a = S_c V_c$$

siendo ρ_0 la densidad (masa por unidad de volumen) del fluido, habiendo supuesto que no varía en toda la longitud estudiada de la vena.

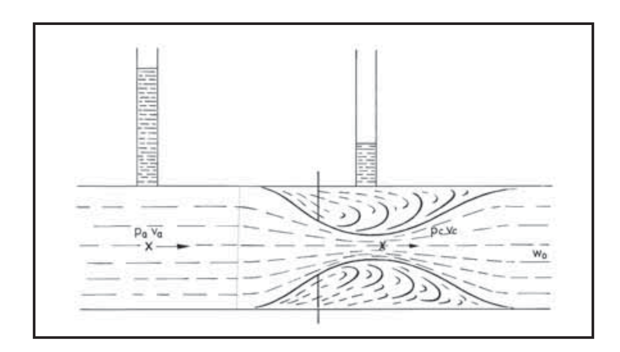


Figura 4.2 Teorema de Bernouilli

De aquí se obtiene:

$$V_c^2 - \frac{S_c^2 V_c^2}{S_a^2} = 2\left(\frac{P_a - P_c}{\rho_0}\right)$$

y llamando d el diámetro del orificio, en m, y D el diámetro interior de la tubería aguas arriba, en m:

$$V_c = \sqrt{\frac{2\frac{P_a - P_c}{\rho_0}}{1-\left(\frac{d}{D}\right)^4}}$$

y llamando β a la relación de diámetros $\beta = d/D$, resulta:

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}\sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}}$$

y llamando $E = \frac{1}{1-\beta^4}$ al coeficiente de velocidad de acercamiento, resulta:

$$V_c = E\sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}}$$

y el caudal, en volumen, será:

$$Q_v = S_c V_c = E\frac{\pi d^2}{4}\sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}}\ m^3/s = K\sqrt{\frac{h}{\rho_0}}\ m^3/s$$

y el caudal, en peso:

$$Q_m = E\frac{\pi d^2}{4}\sqrt{2(P_a - P_c)\times\rho_0}\ \ kg/s = K\sqrt{H}$$

expresando d en m; h, P_a y P_c en Pascal y ρ_0 en Kg/m^3, y siendo K una constante, d el diámetro del orificio y h la presión diferencial producida por el elemento.

Estas fórmulas están limitadas a fluidos incompresibles. Así pues, de forma generalizada, el caudal volumétrico se puede expresar en función de la presión diferencial creada por un elemento deprimógeno como:

$$Q_v = K\sqrt{H}$$

en la que H es la diferencia de alturas de presión del fluido y K es una constante empírica.

Estas fórmulas son aproximadas. En la práctica, se consideran factores de corrección que tienen en cuenta el reparto desigual de velocidades, la contracción de la vena del fluido, las rugosidades de la tubería, el estado del líquido, del gas, del vapor, etc.

La fórmula anterior se afecta de un coeficiente adicional C, llamado "*coeficiente de descarga*", con lo cual:

$$Q_v = CE\frac{\pi d^2}{4}\sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}}$$

Por otro lado, se encuentra que la relación:

$$\alpha = \frac{Q_v}{\frac{\pi d^2}{4}\sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}}}$$

llamada "*coeficiente de caudal*" sólo depende del número de Reynolds:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{V \times D}{\nu} \quad \text{y} \quad \mathrm{Re}_d = \frac{V \times D}{\nu} \times \frac{1}{\beta}$$

con V, la velocidad axial media del fluido aguas arriba y ν, la viscosidad cinemática del fluido.

De aquí:

$$C \times E = \alpha \quad \text{y} \quad C = \alpha/E$$

El caudal masa sería:

$$Q_m = Q_v \times \rho_0 = CE\frac{\pi d^2}{4}\sqrt{2(P_a - P_c) \times \rho_0} \;\; kg/s = K\sqrt{H}$$

En el caso de un fluido compresible, su densidad varía en toda la sección de la vena ya que cambia la presión, la temperatura y el peso específico.

La expresión final que se obtiene es parecida a la de los fluidos incompresibles, introduciendo un coeficiente experimental de expansión ε para tener en cuenta la expansión ocurrida durante la aceleración del flujo. No depende del número de Reynolds y es función de la relación de presiones, de la relación de calores específicos para los fluidos compresibles y de la relación de secciones del elemento y la tubería. La expresión final es:

$$Q_v = CE\varepsilon\frac{\pi d^2}{4}\sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}} \;\; m^3/s$$

expresada en las mismas unidades que la ecuación correspondiente a los fluidos incompresibles. O bien en caudal masa:

$$Q_m = CE\varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2(P_a - P_c) \times \rho_0} \;\; kg/s$$

Si las presiones P_a y P_c se expresaran en bar (1 Pa = 10^{-5} bar) y los diámetros D y d en mm, las expresiones anteriores cambian a:

$$Q_v = CE\varepsilon \frac{\pi^2}{4} \frac{d^2}{106} \sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0} 10^5} \;\; m^3/s \tag{4.1}$$

$$Q_m = CE\varepsilon \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{d^2}{106} \right) \sqrt{2(P_a - P_c) \times 10^5 \rho_0} \;\; kg/s \tag{4.2}$$

En el caso de que la densidad se calcule a partir de la densidad en condiciones normales, la fórmula anterior para fluidos compresibles es aplicable a los gases que sigan la ley de los gases perfectos. En la práctica, la ley no es exactamente verdadera cuando las presiones de servicio superan los 10 bar, debiendo notar que lo es tanto menos cuanto más se acerque el gas a las condiciones críticas.

Elemento	Presión crítica—P_0		Temperatura crítica—T_0		Coeficiente isentrópico x (Cp/Cv)
	psia	bars (abs)	°F	°C	
Ácido acético	841	58,0	612	322	
Acetona	691	47,6	455	235	
Acetileno	911	62,9	97	36	1,24
Aire	547	37,8	- 222	- 141	1,41
Amoníaco	1638	113,0	270	132	1,31
Argón	705	48,6	- 188	- 122	1,67
Benceno	701	48,4	552	289	
Butano	529	36,5	307	153	1,10
Dióxido de carbono	1072	74,0	88	31	1,30
Monóxido de carbono	514	25,5	- 218	- 139	1,40
Tetracloruro de carbono	661	45,6	541	283	
Cloro	1118	77,0	291	144	
Etano	717	49,5	90	32	1,19
Alcohol etílico	927	64,0	469	243	
Etileno	742	51,2	50	10	1,24
Éter etílico	522	36,0	383	195	1,13
Flúor	367	25,3	- 247	- 155	
Helio	33,2	2,29	- 450	- 268	1,66
Heptano	394	27,2	513	267	
Hidrógeno	188	13,0	- 400	- 240	1,41
Ácido clorhídico	1199	82,6	124	51	
Isobutano	544	37,5	273	134	
Alcohol isopropílico	779	53,7	455	235	
Metano	673	46,4	- 117	- 83	1,31
Alcohol metílico	1156	79,6	464	240	1,203
Nitrógeno	492	34,0	- 233	- 147	1,40
Óxido nitroso	1054	72,7	99	37	
Octano	362	25,0	565	296	
Oxígeno	730	50,4	- 182	- 119	1,40
Pentano	485	33,5	387	197	
Fenol	889	61,3	786	419	

Tabla 4.1 *Constantes críticas de los gases*

De aquí que la densidad del gas se aparte de la teórica dependiendo de la temperatura y de la presión críticas. Las desviaciones están representadas por el coeficiente de compresibilidad Z, que es la relación entre la densidad, considerando el gas perfecto, y la densidad real.

En la figura 4.3 puede determinarse el valor de Z directamente. Otra forma de determinar el factor de compresibilidad es emplear la ecuación de estado reducida de los gases. En esta ecuación se usan las magnitudes reducidas de la presión y la temperatura (P_r y T_r), es decir, los cocientes entre la magnitud en cuestión y la correspondiente magnitud crítica.

De este modo:

$$P_r = P/P_c \quad \text{y} \quad T_r = T/T_0$$

y la ecuación reducida es:

$$P_r V_r = ZnRT_r$$

con:

V_r = volumen reducido = V/V_c

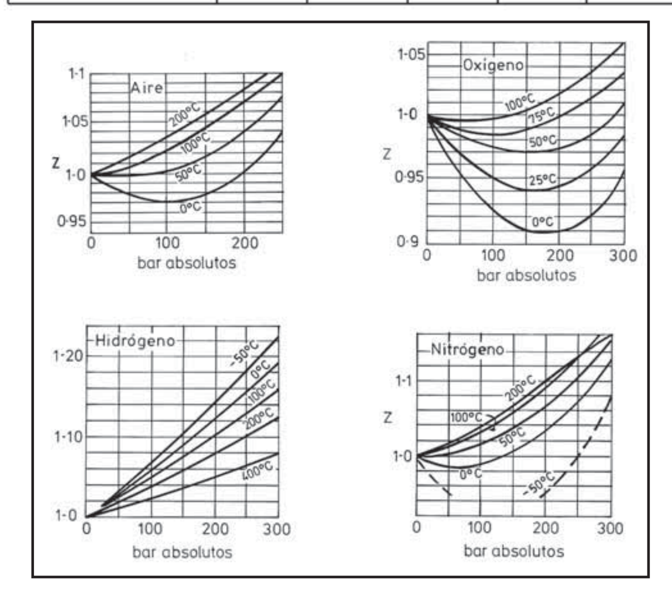
n = número de moles de gas

R = constante general de los gases

Z = coeficiente de compresibilidad que corrige directamente la densidad del gas

La determinación de Z se logra empleando las curvas de coeficientes de compresibilidad de la figura 4.4, conjuntamente con la tabla que da las constantes críticas de algunos gases.

Elemento	Presión crítica — P_0		Temperatura crítica — T_0		Coeficiente isentrópico x (Cp/Cv)
	psia	bars (abs)	°F	°C	
Fosgeno	823	56,7	360	182	
Propano	617	42,6	207	97	1,33
Propileno	661	45,6	198	92	
Refrigerante 12	582	40,1	234	112	
Refrigerante 22	713	19,2	207	97	
Dióxido de azufre	1142	78,8	315	157	
Agua	3206	221,0	705	374	1,30



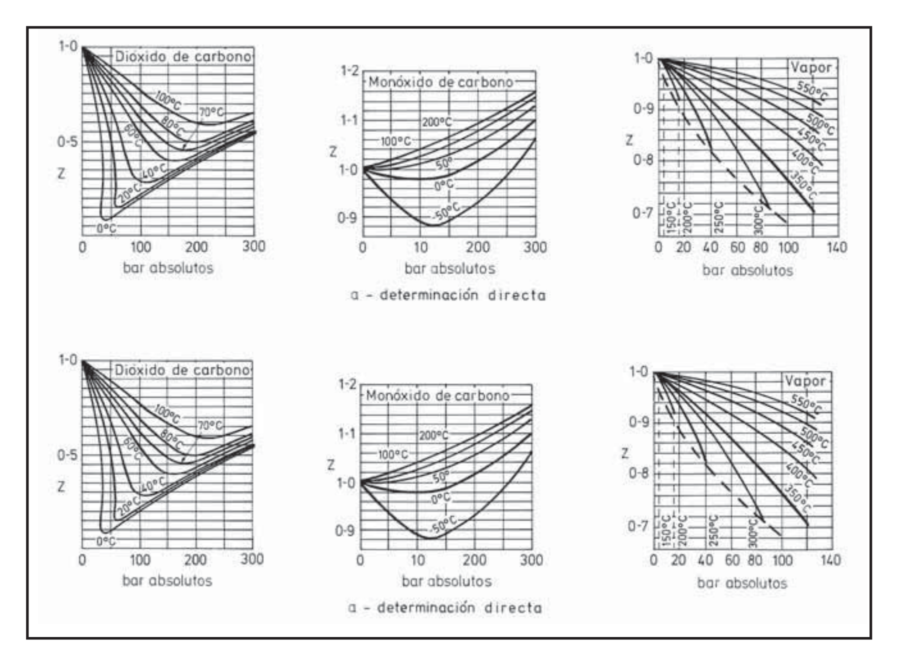


Figura 4.3 Coeficientes de compresibilidad

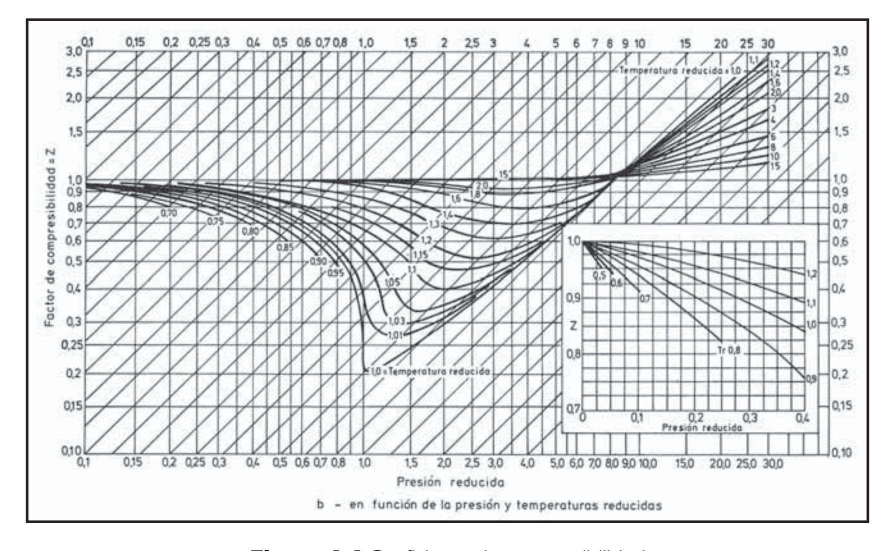


Figura 4.4 Coeficiente de compresibilidad

Cuando el gas transporta vapor de agua, sin contener partículas de agua, deja de ser puro y se considera húmedo. La densidad del gas húmedo se desvía del correspondiente al gas seco de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$\omega_h = \frac{P_h - fP_v}{P_n} \times \frac{T_n}{T_h} \times \frac{1}{Z} \times \omega_s + fw_v$$

en la que:

ω_h = densidad del gas húmedo en condiciones de servicio (kg/m^3)

ω_s = densidad del gas seco en condiciones estándar (kg/m^3)

w_v = peso específico del vapor saturado en las condiciones de servicio (kg/m^3)

P_h = presión absoluta del gas húmedo

P_n = presión absoluta del gas seco en condiciones estándar (1 atm= 1,013 bar)

P_v = presión absoluta del vapor saturado en las condiciones de medida en bar

T_h = temperatura absoluta del gas húmedo ($273° + tK$)

T_n = temperatura absoluta del gas seco en condiciones estándar = 288 K

Z = coeficiente de compresibilidad

f = humedad relativa

La adición de vapor de agua a una cantidad determinada de gas seco influye en el caudal correspondiente a una presión diferencial dada de dos modos distintos: por un lado, la densidad del gas húmedo cambia con relación a la del gas seco y, por otro, el gas medido es sólo una parte de la mezcla que pasa a través del elemento.

De aquí que el factor de corrección N para gas húmedo debe ser directamente proporcional al porcentaje del peso del gas seco con relación al peso de la mezcla y directamente proporcional a la raíz cuadrada del porcentaje de densidades entre el gas húmedo y el seco (este último a la misma presión P_h). Es decir, si ρ_g = densidad relativa del gas seco, w = tensión del vapor de agua = $f \times P_r$ y su densidad relativa es 0,624, resulta:

$$\frac{densidad\ gas\ humedo}{densidad\ gas\ seco} = \frac{\frac{P_h - w}{1,013} \times \frac{288}{273+t} \times \frac{1}{Z} \times r_g \times 1,293 + \frac{w}{1,013} \times \frac{288}{273+t} \times \frac{1}{Z} \times 0,624 \times 1,293}{\frac{P_h}{1,013} \times \frac{288}{273+t} \times \frac{1}{Z} \times r_g \times 1,293} = \frac{(P_h - w) r_g + 0,624 \times w}{P_h \times r_g}$$

luego:

$$\frac{peso\ gas\ seco\ en\ mezcla}{peso\ total\ de\ la\ mezcla} = \frac{\frac{P_h - w}{1,013} \times \frac{288}{273+t} \times \frac{1}{Z} \times r_g \times 1,293}{\frac{P_h - w}{1,013} \times \frac{288}{273+t} \times \frac{1}{Z} \times r_g \times 1,293 + \frac{w}{1,013} \times \frac{288}{273+t} \times \frac{1}{Z} \times 0,624 \times 1,293} = \frac{(P_h - w) \times r_g}{(P_h - w) \times r_g + 0,624 \times w}$$

luego:

$$N = \frac{(P_h - w) r_g}{(P_h - w) r_g + 0,624\, w} \sqrt{\frac{(P_h - w) r_g + 0,624\, w}{P_h r_g}} = \sqrt{\frac{P_h - w}{P_h + \frac{0,624\, P_h \times w}{(P_h - w) r_g}}}$$

y llamando $P_h/w = B$, resulta:

$$N = \sqrt{\frac{B - 1}{B + \frac{0,624\, B}{(B - 1) r_g}}}$$

fórmula que da directamente el factor de corrección para gas húmedo en función de:

$$B = \frac{P_h}{w} = \frac{Presión\ absoluta\ del\ gas\ húmedo}{Presión\ del\ vapor\ de\ agua}$$

Esta fórmula está representada en la figura 4.5 en función de la temperatura de saturación del gas (punto de rocío) y de su peso específico. Los pasos a seguir en la lectura del gráfico son los siguientes:

1. Del punto de rocío en la escala superior se determina la presión de vapor w mediante la línea de presiones correspondiente.
2. Se obtiene B como cociente de la presión absoluta del gas P_h y de w.
3. Con B en la escala vertical derecha y, mediante las curvas de peso específico, se lee en la escala inferior el factor N.

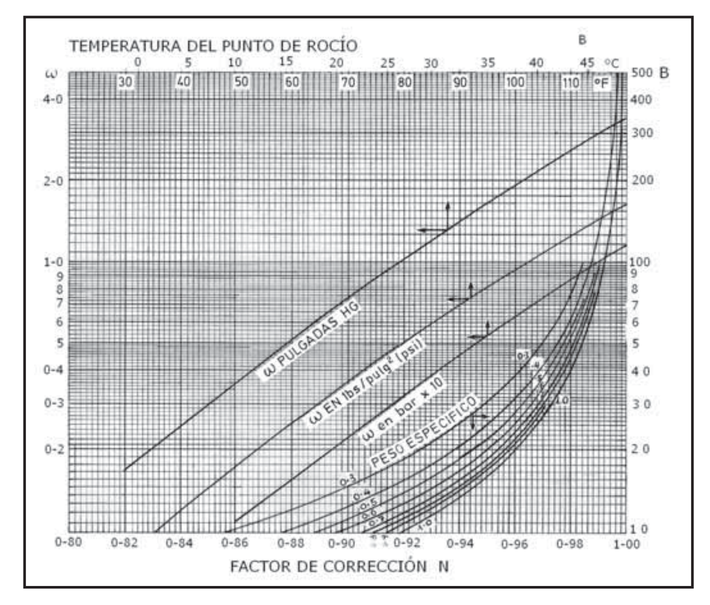


Figura 4.5 Factor de corrección de humedad del gas

En ocasiones, el caudal del fluido es pulsante debido a la acción de bombas de pistón, compresores, ventiladores, etc. Como es lógico, es necesario amortiguarlo y ello se realiza en los instrumentos de medida mediante los dispositivos amortiguadores de que disponen. La señal resultante obtenida es el promedio de la presión diferencial efectiva, de modo que el caudal leído en el instrumento es:

$$Q_m = C\sqrt{\frac{\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \ldots + \Delta P_n}{n}}$$

Sin embargo, el caudal real promedio que el instrumento leería realmente, si fuera capaz de trabajar sin amortiguación, sería:

$$Q_{m'} = C\left[\frac{\sqrt{\Delta P_1} + \sqrt{\Delta P_2} + \sqrt{\Delta P_3} + \ldots + \sqrt{\Delta P_n}}{n}\right]$$

El error Q_m - $Q_{m'}$ es siempre positivo dependiendo del tipo de pulsaciones y del sistema de amortiguamiento. Para disminuir este error es necesario aumentar la pérdida de carga o bien el volumen que se encuentra entre la máquina, causa de las pulsaciones, y el punto de medida del caudal.

En la selección de la presión diferencial, que el elemento de medida (diafragma, tobera, tubo Venturi) producirá para el caudal máximo del fluido fijado en el cálculo, se presentan dos factores importantes a considerar, la presión de la línea y la pérdida de carga máxima del elemento. Ambos factores influyen en el costo de funcionamiento de la instalación, es decir, en el costo necesario para que el fluido pase a través del elemento. Asimismo, la conveniencia de lograr una exactitud casi constante en todo el campo de medida de la presión diferencial es otro compromiso a satisfacer. Depende de la relación de diámetros y de la situación del elemento en la tubería conjuntamente con los tramos rectos y accesorios que se encuentren aguas arriba y aguas abajo del elemento.

Pres. dif. máx.		** Presión estática mínima recomendada	
mm c. de a.	Pulgadas c. de a.	mm y bar	pulgadas y psig
64	2.536*	0 mm c. de a.	0" H_2O ga
102	4.019*	127 mm c. de a.	5" H_2O ga
127	5.000	178 mm c. de a.	7" H_2O ga
162	6.370	254 mm c. de a.	10" H_2O ga
254	10.000	508 mm c. de a.	20" H_2O ga
256	10.099*	508 mm c. de a.	20" H_2O ga
406	16.000	889 mm c. de a.	35" H_2O ga
508	20.000	0,14 bar	2 psig
552	21.722	0,14 bar	2 psig
635	25.000	0,7 bar	10 psig
644	25.360	0,7 bar	10 psig
874	34.429	0,7 bar	10 psig
1270	50.000	1,4 bar	20 psig
1386	54.562	1,7 bar	25 psig
1453	57.210	2,5 bar	35 psig
2196	86.479	3,2 bar	45 psig
2540	100.00	4,2 bar	60 psig
3270	128.73	4,2 bar	60 psig
3481	137.05	4,9 bar	70 psig
5080	200.00	7 bar	100 psig
5518	217.23	7 bar	100 psig
5813	228.86	7 bar	100 psig
7620	300.00	9,8 bar	140 psig
8744	344.26	10,5 bar	150 psig
10160	400.00	12,6 bar	180 psig
12700	500.00	15,5 bar	220 psig
15240	600.00	18,3 bar	260 psig
17780	700.00	21,1 bar	300 psig
20320	800.00	23,9 bar	340 psig
22860	900.00	26,7 bar	380 psig
25400	1000.00	29,5 bar	420 psig

* Diferenciales utilizados sólo para gases.
** En caudales de gases o de vapores, el diferencial en pulgadas de c. de a. no debe exceder la presión estática total de psia.

Tabla 4.2 Presión diferencial máxima

Los compromisos anteriores entre los varios factores expuestos se reflejan en la tabla 4.2, que relaciona la presión diferencial máxima que el elemento puede admitir con la presión estática en

la línea y con los gráficos de longitudes rectas de tubería y pérdidas de carga. Hay que señalar que en la medida de caudales de líquidos se emplea normalmente una presión diferencial de 2500 mm c. de a. (100" c. de a.).

1º accesorio aguas arriba	Distancia aguas arriba entre el medidor y el primer accesorio (múltiplos Φ tubería)													Distancia aguas abajo 2º accesorio (múltiplos Φ tubería)	Elementos primarios
	β = Φ orificio/Φ interior tubería													β = Φ orificio/Φ interior tubería	
	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,2 a 0,8	
Curva de 90º o T	10	10	10	12	14	14	14	16	18	22	28	36	46	14	1
			0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	2,5	3,0	4,0	4,0	4,5		14	2
Dos o mas curvas de 90º (radio D) en el mismo plano	14	14	16	16	18	18	20	22	26	32	36	42	50	18	1
			1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3,0	4,5	4,5	4,5		18	2
Dos o mas curvas de 90º (radio D) en diferentes planos	34	34	34	36	36	38	40	44	48	54	62	70	80	31	1
			0,5	0,5	0,5	0,5	8,5	12,5	17,5	23,5	27,5	29,5		31	2
Reductor 2D a D en una longitud de 3D, Venturi 3D a D en 3,5D	5	5	5	5	5	5	6	8	9	11	14	22	30	7	1
				1,5	2,5	4,5	5,5	6,5	8,5	9,5	10,5	11,5		7	2
Expansión 0,5D a D en una longitud de 1,5D, Venturi 0,75D a D en D	16	16	16	16	16	17	18	20	22	25	30	38	54	15	1
			1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3,5	3,5	4,5	5,5	6,5		15	2
Válvula de globo (totalmente abierta)	18	18	18	18	20	20	22	24	26	28	32	36	44	16	1
			2,5	2,5	3,5	3,5	4,5	4,5	4,5	5,5	5,5	6,5		16	2
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	12	12	12	12	12	12	12	14	14	16	20	24	30	10	1
			1,5	2,5	2,5	3,5	3,5	4,5	4,5	4,5	5,5	5,5		10	2
Reducción simétrica abrupta de 2D a D	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	15	1
							30	30	30	30	30	30		15	2
Tanque	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	1
			30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		30	2

1 - Placa-orificio y tobera / 2 - Tubo Venturi

Figura 4.6 Tramos rectos de tubería para la instalación del elemento

La instalación de los elementos de presión diferencial requiere que se respeten unas distancias de tramos rectos de la tubería, antes y después del elemento. En la figura 4.6 pueden verse estas normas generales en las cuales se señalan en abscisas la relación de diámetros d/D (0 interior del elemento a 0 tubería) y en ordenadas las distancias expresadas en diámetros de tubería. En general, el tramo de tubería recta es de 16 a 44 diámetros de tubería aguas arriba y de 2,5 a 5 diámetros de tubería aguas abajo.

Cuando la longitud de tubería recta disponible es pequeña, debido a las condiciones de instalación por codos, curvas, válvulas, etc., y las distancias son críticas, se utilizan dispositivos llamados *enderezadores de venas* que dan un régimen laminar del fluido y permiten reducir el espacio recto necesario (figura 4.7).

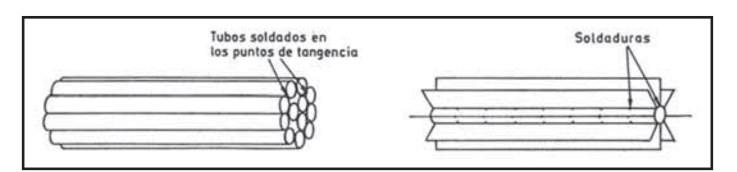


Figura 4.7 Enderezadores de venas

Por otro lado, los elementos de presión diferencial absorben una pérdida de carga que depende de la relación de diámetros d/D y que es una fracción de la presión diferencial que crea el elemento.

En la figura 4.8 puede verse el porcentaje de presión diferencial absorbida, pudiendo apreciarse que el orden de pérdida de carga de mayor a menor es placa-orificio/tobera/tubo Venturi.

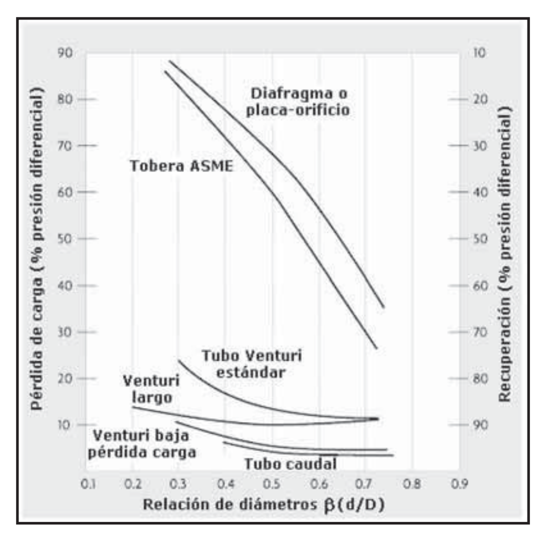


Figura 4.8 Pérdida de carga de los elementos de presión diferencial

4.1.1.2 Elementos de presión diferencial

Los elementos de presión diferencial son los siguientes:

La *placa-orificio* o *diafragma* consiste en una placa perforada instalada en la tubería. Dos tomas, conectadas en la parte anterior y posterior de la placa, captan esta presión diferencial proporcional al cuadrado del caudal. La disposición de las tomas puede verse en la figura 4.9.

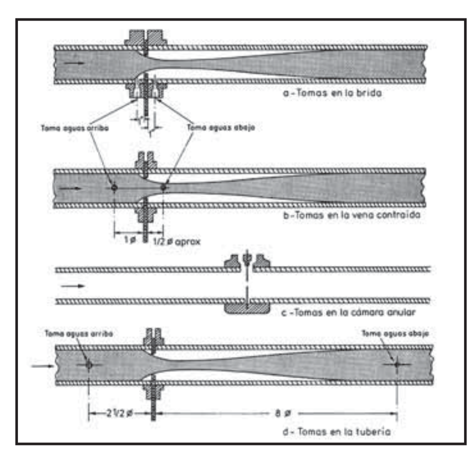


Figura 4.9 Disposición de las tomas de presión diferencial

Tomas en la brida (*flange taps*) (figura 4.9a). Es bastante utilizada porque su instalación es cómoda, ya que las tomas están taladradas en las bridas que soportan la placa y situadas a 1" de distancia de la misma.

Tomas en la vena contraída (*vena contracta taps*) (figura 4.9b). La toma posterior está situada en un punto donde la vena alcanza su diámetro más pequeño, lo cual depende de la razón de diámetros y se presenta aproximadamente a 1/2 Ø de la tubería. La toma anterior se sitúa a 1 Ø de la tubería.

Tomas radiales (*radius taps*). Son parecidas a las tomas de vena contraída, pero fijando siempre las tomas anterior y posterior a 1 y 1/2 Ø de la tubería, respectivamente.

Tomas en la cámara anular (*corner taps*) (figura 4.9c). Las tomas están situadas inmediatamente antes y después del diafragma y requieren el empleo de una cámara anular especial. Se émplean mucho en Europa.

Tomas en la tubería (*pipe taps*) (figura 4.9d). Las tomas anterior y posterior están situadas a 2 ½ Ø y 8 Ø, respectivamente. Se emplean cuando se desea aumentar el intervalo de medida de un medidor de caudal dado. La situación de las tomas está en un lugar menos sensible a la medida.

El orificio de la placa puede ser *concéntrico*, *excéntrico* o *segmental*, con un pequeño orificio de purga para los pequeños arrastres sólidos o gaseosos que pueda llevar el fluido (figura 4.10a). Los dos últimos diafragmas permiten medir caudales de fluidos que contengan una cantidad pequeña de sólidos y de gases. La exactitud obtenida con la placa es del orden de ± 1% a ± 2 %.

La *tobera* está situada en la tubería con dos tomas, una anterior y la otra en el centro de la sección más pequeña. La tobera permite caudales del 60% superiores a los de la placa-orificio en las mismas condiciones de servicio. Su pérdida de carga es del 30% al 80% de la presión diferencial. Puede emplearse para fluidos que arrastren sólidos en pequeña cantidad, si bien, si estos sólidos son abrasivos, pueden afectar a la precisión del elemento. El coste de la tobera es de 8 a 16 veces el de un diafragma y su exactitud es del orden de ± 0,95% a ± 1,5%.

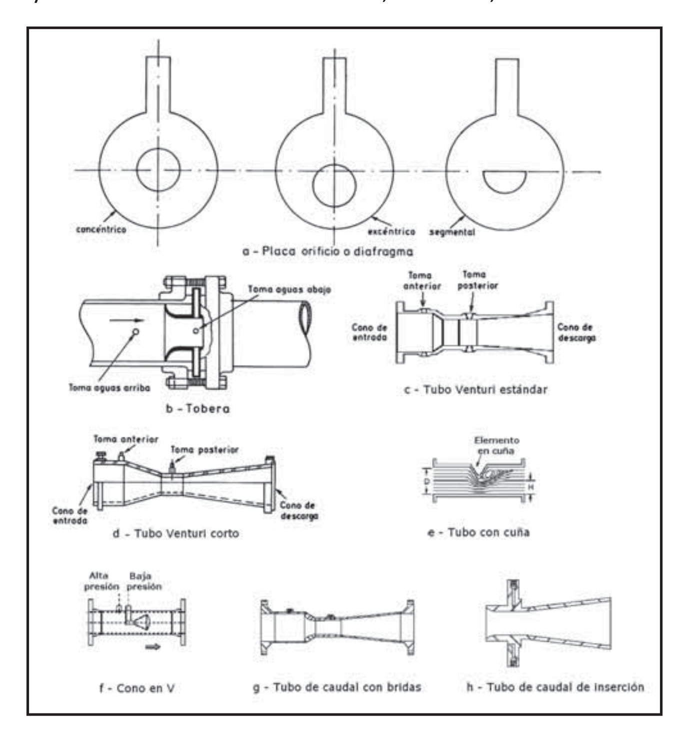


Figura 4.10 Tipos de elementos

El *tubo Venturi* (figura 4.10c) permite la medición de caudales del 60% superiores a los de la placa orificio, en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga de sólo del 10% al 20% de la presión diferencial. Posee una gran exactitud y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos, si bien, los sólidos abrasivos influyen en su forma afectando la exactitud de la medida. El coste del tubo Venturi es elevado, del orden de 20 veces al de un diafragma y su precisión es del orden de ± 0,75% .

El *tubo Dall* es una combinación del tubo Venturi y de la placa-orificio que fue introducido en los años 1960. Se caracteriza por un ángulo brusco en la parte central que magnifica la presión diferencial con relación al tubo Venturi. Sin embargo, no predice con suficiente exactitud el coeficiente de descarga del elemento, de modo que es necesario disponer de más datos para calcular el rendimiento. En 1970 se descubrió que el coeficiente de descarga del tubo Dall era una función del número de Reynolds y que tenía un error en la medida del caudal de un 12%. Por este motivo, cayó en desuso.

En fluidos difíciles (lodos) de viscosidad apreciable o corrosivos, se utilizan elementos tales como el de cuña y el de cono en V que proporcionan una mejor recuperación de la presión del fluido, es decir, la pérdida de carga que absorben es pequeña. Las tomas suelen estar aisladas del proceso y, de este modo, no presentan el riesgo de obturación de las tomas de presión y de los tubos que comunican con el transmisor de presión diferencial.

El medidor de *cuña* tiene una restricción en V que se caracteriza por la relación H/D, siendo H la altura de la abertura en la restricción y D el diámetro de la tubería (semejante a la relación $\beta = d/D$). La exactitud puede llegar al ± 0,5%, si bien es del ± 3% al ± 5% cuando la densidad del fluido (lodos) no permanece constante. Puede utilizarse para fluidos que circulen bidireccionalmente. Su pérdida de carga es el 50% de la de una placa orificio. Su rangeabilidad (relación entre los valores máximo y mínimo del caudal) puede llegar a 8:1. Se aplica en la industria petroquímica, en la extracción de petróleo y en fluidos difíciles de alta viscosidad (lodos, aguas negras, etc.).

El medidor de *cono en V* tiene un cono centrado en la tubería que, al paso del fluido, crea una zona de baja presión aguas abajo, la que capta un orificio practicado en la base del cono. El cono optimiza el perfil de velocidades del fluido, ya que debido a su forma mezcla la alta velocidad del fluido en el centro del medidor con la baja velocidad existente cerca de las paredes. Esta optimización amortigua las pulsaciones de caudal del fluido y contribuye a una baja pérdida de carga del medidor. Su exactitud es del orden del ± 0,5% de la lectura y su repetibilidad del ± 0,1%. Su rangeabilidad (relación entre los valores máximo y mínimo del caudal) es de 10 a 1 frente al clásico 3 a 1 de la placa-orificio. Requiere de 0 a 3 diámetros de tubería recta aguas arriba y de 0 a 1 diámetro aguas abajo.

Los *tubos de caudal* son derivaciones del tubo Venturi que se caracterizan por su baja pérdida de carga. Su exactitud es del ± 0,5% pudiendo llegar al ± 0,25% calibrado en laboratorios.

Para el cálculo de los diafragmas, toberas y tubos Venturi se utilizan normas variadas, entre las cuales se encuentran las siguientes:

- ISO 5167-1980 *Medida del flujo de fluidos por medio de placas-orificio, toberas o tubos Venturi, insertados en conductos de sección circular*. *Intemational Organization for Standarization*, Ginebra, Suiza.
- ISO-5167 (1991) - *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full.*

    Part 1: Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes.

    Revisión 1:1998. *Intemational Organization for Standarization*, Ginebra, Suiza.

- ISO-5167 (2003) *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full*.

    Part 1: General principles and requirements.

    Part 2: Orifice Plates.

    Part 3: Nozzles and Venturi nozzles.

    Part 4: Venturi tubes.
- Norma ASME 19.5 *Flowmeter Computation Handbook*. *American Society for Mechanical Engineers*, New York, 1971.
- ASME MFC-3M (1989 y 2004) *Measurements of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle and Venturi.*
- Norma ASME MFC-14M-2001 *Measurement of fluid flow using small bore precision orifice*. *American Society for Mechanical Engineers*, New York, 2001.
- ANSI/API 2530-AGA *Report No. 3 (1985 y 1992) Orifice Metering of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Fluids. American Gas Association* (AGA).

    Part 3 Natural Gas Applications.
- *Principle and Practice of Flow Meter Engineering*, L. K. Spink (1978).

En estas normas se indican las pérdidas de carga de los elementos y las condiciones de instalación en tramos rectos de las tuberías con distancias mínimas a codos, curvas, válvulas, etc. Cuando estas condiciones de distancia son críticas, se utilizan dispositivos llamados *enderezadores de venas* que dan un régimen laminar del fluido y permiten reducir el espacio recto necesario (figura 4.7).

Como ejemplo, figuran a continuación las bases de cálculo y un resumen de la norma ISO. Esta norma es bastante empleada en Europa y su utilización es cómoda. Como ejemplo ilustrativo se expone el cálculo de una placa-orificio para un fluido incompresible.

4.1.1.3 Resumen de la norma ISO 5167-1980

Fluidos incomprensibles

La norma ISO 5167-1980 aplicada al cálculo de los elementos de presión diferencial para fluidos incompresibles que pasan a través de la placa-orificio, tobera o tubo Venturi (figura 4.11a, b y c) sigue la marcha que podemos observar en la figura.

La fórmula del caudal es:

$$Q_v = 3,512 \times 10^4 \times \alpha \times \beta^2 \times \varepsilon \times D^2 \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho_0}}$$

$$Q_m = 3,512 \times 10^4 \times \alpha \times \beta^2 \times \varepsilon \times D^2 \sqrt{(P_1 - P_2) \times \rho_0}$$

en la que:

Q_v = caudal volumétrico en m^3

Q_m = caudal volumétrico en m^3

C = coeficiente de descarga

α = coeficiente de caudal

E = coeficiente de velocidad de acercamiento = $\dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

con β = relación de diámetros (d/D)

d = Ø mínimo del orificio del elemento en mm

D = Ø interior de la tubería en mm

P_1 = presión estática absoluta en el ángulo muerto antes del elemento en bar

P_2 = presión estática absoluta en el ángulo muerto después del elemento en bar

ρ_0 = densidad del fluido en las condiciones P_0, T_0 en kg/m³

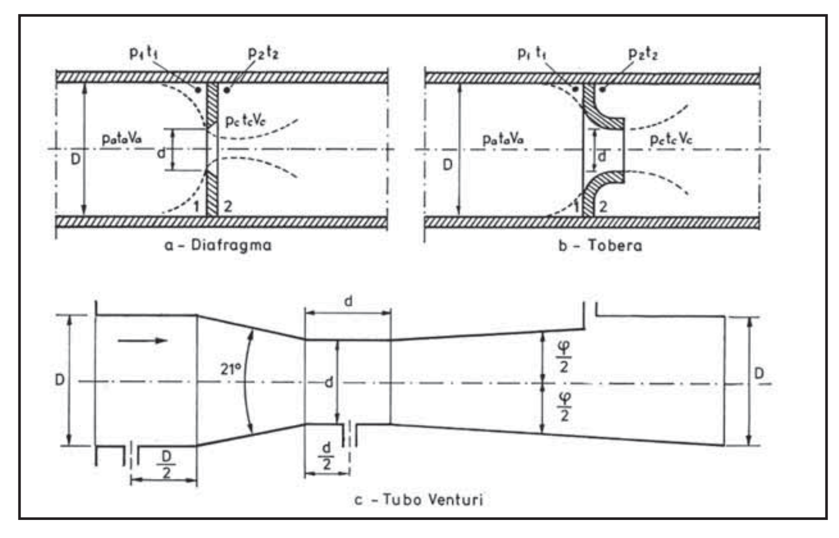


Figura 4.11 Placa-orificio, tobera y tubo Venturi

Para el cálculo de las dimensiones del elemento se despeja el término $\alpha\beta^2$ de las fórmulas anteriores, resultando:

Diafragma, tobera o tubo Venturi:

$$\alpha\beta^2 = \frac{4Q_v}{\varepsilon\pi D^2\sqrt{2\dfrac{P_1-P_2}{\rho_0}}}$$

o en función del caudal masa:

$$CJ\alpha\beta^2 = \frac{4Q_m}{\varepsilon\pi D^2\sqrt{2(P_1-P_2)\rho_0}}$$

expresiones en las cuales el segundo término es conocido. A continuación, y por aproximaciones sucesivas, se determina la relación final de diámetros β del elemento primario seleccionado, de acuerdo con la aproximación deseada en el cálculo, que suele ser de 0,01%.

Si se desea un cálculo rápido del elemento deprimógeno, basta considerar:

Coeficiente de descarga de la placa-orificio = 0,6

Coeficiente de descarga de la tobera y del tubo Venturi = 1

Velocidad de acercamiento = 1

Y las fórmulas de cálculo son las siguientes:

Placa-orificio y tobera:

$$d = \sqrt{\frac{Q_m \times 10^4}{2{,}1 \times \sqrt{PD \times \rho}}}$$

Tubo Venturi:

$$d = \sqrt{\frac{Q_m \times 10^4}{3{,}5 \times \sqrt{PD \times \rho}}}$$

en las que:

d = diámetro del orificio, en mm

Q_m = caudal masa, en kg/s

PD = presión diferencial, en bar

ρ = densidad del fluido en condiciones de servicio, en kg/m^3

La marcha a seguir en el cálculo normal del elemento es la siguiente (se ha seguido un procedimiento de cálculo parecido al expuesto en la obra *Shell Flow Meter Engineering Handbook* que sigue la norma ISO 5167-1980, citado en las referencias):

Diafragma con tomas en la brida

1. El diámetro D de la tubería a la temperatura del fluido es:

$$D = D_0 \times \left[1 + H \times 10^{-5}(t - t_0)\right]$$

siendo:

D = diámetro a la temperatura de paso del fluido, en mm

D_0 = diámetro medido a temperatura ambiente, en mm

H = coeficiente de dilatación de la tubería, en mm/m

t - t_0 = diferencia de temperaturas entre la del fluido y la ambiente, en °C

2. Numero de Reynolds:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{1{,}2732 \times 10^6 \times Q_m}{\eta D}$$

con:

Q_m = caudal de diseño, en kg/s

η = viscosidad absoluta o dinámica en mPa $\times$ s (centipoise) en condiciones de servicio (ver tablas 4.4 y 4.5)

3. Se calcula un valor aproximado de β de acuerdo con la fórmula:

$$\beta = \left[\frac{Q_m^2}{4,6 \times 10^{-10} \times D^4 \times PD \times \rho + Q_m^2} \right]^{0,25}$$

Se consulta el gráfico de la figura 4.12 del número de Reynolds para comprobar los límites de sus valores con relación a β.

La tabla que sigue proporciona los valores máximos que puede tener la rugosidad relativa k/D de la tubería, para una distancia de 10 diámetros de tubería aguas arriba de la placa orificio, para satisfacer la norma ISO.

β	0,3	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,75
$k/D \cdot 10^4$	25	18,1	12,9	10	10	10	10	10	10	10	10

Si $k/D \times 10^4$ es < 10 no hay límite para el valor de β.

4. A partir del valor anterior de β se calcula el factor de expansión ε (en los líquidos es 1). El coeficiente isentrópico κ, o relación de calores específicos a presión constante y a volumen constante, respectivamente, puede consultarse en la tabla 4.1.

Dilatación media materiales mm/m a 1.000 ºC						
Material tubería	0 y 100ºC	0 y 200ºC	0 y 300ºC	0 y 400ºC	0 y 500ºC	0 y 600ºC
Acero	1,17	1,22	1,28	1,33	1,38	1,43
Fundición	1,04	1,09	1,15	1,2	1,26	1,32
Bronce	1,75	1,79	1,83	1,88	1,92	–
Acero inoxidable 18/8	1,6	1,65	1,71	1,76	1,8	1,84
Acero con 13% Cromo	1,05	1,1	1,13	1,17	1,2	1,22

Tabla 4.3 Dilatación media de materiales en mm/m y para 1000 ºC
(multiplicar por 0.001 para obtener mm/m ºC)

Liquido	*X*	*Y*
Aceite de linaza	7,5	27,2
Acetaldehído	15,2	4,8
Acetato de amilo	11,8	12,5
Acetato de butilo	12,3	11,0
Acetato de etilo	13,7	9,1
Acetato de metilo	14,2	8,2
Acetato de vinilo	14,0	8,8
Acetona, 100 %	14,5	7,2
Acetona, 35 %	7,9	15,0
Ácido acético, 100 %	12,1	14,2
Ácido acético, 70 %	9,5	17,0
Ácido butírico	12,1	15,3
Ácido clorhídrico, 31,5 %	13,0	16,6
Ácido clorosulfónico	11,2	18,1
Ácido fórmico	10,7	15,8
Ácido isobutírico	12,2	14,4
Ácido nítrico, 95 %	12,8	13,8
Ácido nítrico, 60 %	10,8	17,0

Tabla 4.4 Viscosidad y densidad de líquidos
(X e Y son las coordenadas para determinación de la viscosidad según los gráficos)

Líquido	*X*	*Y*
Ácido propiónico	12,8	13,8
Ácido sulfúrico, 110 %	7,2	27,4
Ácido sulfúrico, 98 %	7,0	24,8
Ácido sulfúrico, 60 %	10,2	21,3
Agua	10,2	13,0
Alcohol alílico	10,2	14,3
Alcohol amílico	7,5	18,4
Amoníaco, 100 %	12,6	2,0
Amoníaco, 26 %	10,1	13,9
Anhídrido acético	12,7	12,8
Anilina	8,1	18,7
Anisol	12,3	13,5
Benceno	12,5	10,9
Bromo	14,2	13,2
Bromotolueno	20,0	15,9
Bromuro de etilo	14,5	8,1
Bromuro de propilo	14,5	9,6
Butanol	8,6	17,2
Ciclohexanol	2,9	24,3
Clorobenceno	12,3	12,4
Cloroformo	14,4	10,2
Clorotolueno, orto	13,0	13,3
Clorotolueno, meta	13,3	12,5
Clorotolueno, para	13,3	12,5
Cloruro de calcio, sol. 25 %	6,6	15,9
Cloruro estánnico	13,5	12,8
Cloruro de etilo	14,8	6,0
Cloruro de metilo	15,0	3,8
Cloruro de propilo	14,4	7,5
Cloruro de sodio, sol. 25 %	10,2	16,6
Cloruro de sulfurilo	15,2	12,4
Cresol, meta	2,5	20,8
Dibromoetano	12,7	15,8
Dicloroetano	13,2	12,2
Diclorometano	14,6	8,9
Difenilo	12,0	18,3
Dióxido de azufre	15,2	7,1
Dióxido de carbono	11,6	0,3
Etanol, 100 %	10,5	13,8
Etanol, 95 %	9,8	14,3
Etanol, 40 %	6,5	16,6
Éter etílico	14,5	5,3
Etilbenceno	13,2	11,5
Fenol	6,9	20,8
Formiato de etilo	14,2	8,4
Freón-11	14,4	9,0
Freón-12	16,8	5,6
Freón-21	15,7	7,5
Freón-22	17,2	4,7
Freón-113	12,5	11,4
Glicerina, 100 %	2,0	30,0
Glicerina, 50 %	6,9	19,6
Glicol	6,0	23,6
Heptano	14,1	8,4
Hexano	14,7	7,0
Hidróxido sódico, 50 %	3,2	25,8
Ioduro de etilo	14,7	10,3
Ioduro de propilo	14,1	11,6
Isobutanol	7,1	18,0
Isopropanol	8,2	16,0
Keroseno	10,2	16,9

Tabla 4.4 Viscosidad y densidad de líquidos (continuación)

Líquido	X	Y
Mercurio	18,4	16,4
Metanol, 100 %	12,4	10,5
Metanol, 90 %	12,3	11,8
Metanol, 40 %	7,8	15,5
Metiletilcetona	13,9	8,6
Naftaleno	7,9	18,1
Nitrobenceno	10,6	16,2
Nitrotolueno	11,0	17,0
Octano	13,7	10,0
Octanol	6,6	21,1
Oxalato de dietilo	11,0	16,4
Oxalato de dimetilo	12,3	15,8
Oxalato de dipropilo	10,3	17,7
Pentacloroetano	10,9	17,3
Pentano	14,9	5,2
Propanol	9,1	16,5
Sodio	16,4	13,9
Sulfuro de carbono	16,1	7,5
Tetracloroetano	11,9	15,7
Tetracloroetileno	14,2	12,7
Tetracloruro de carbono	12,7	13,1
Tetracloruro de titanio	14,4	12,3
Tolueno	13,7	10,4
Trementina	11,5	14,9
Tribromuro de fósforo	13,8	16,7
Tricloroetileno	14,8	10,5
Tricloruro de arsénico	13,9	14,5
Tricloruro de fósforo	16,2	10,9
Xileno, orto	13,5	12,1
Xileno, meta	13,9	10,6
Xileno, para	13,9	10,9

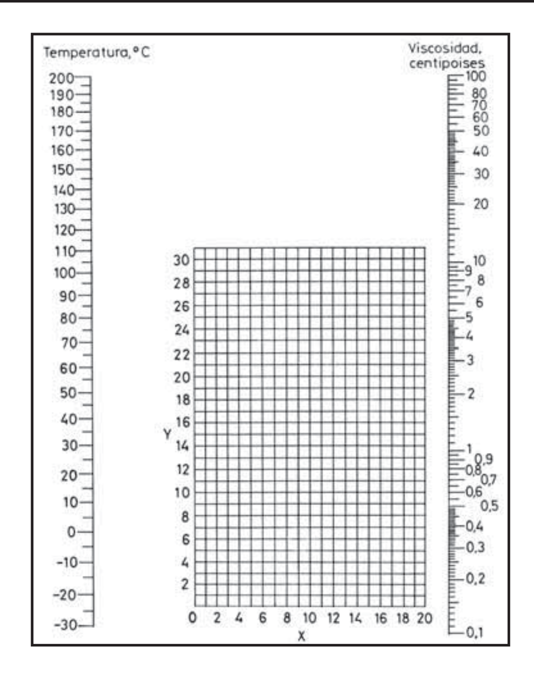


Tabla 4.4 Viscosidad y densidad de líquidos (continuación)

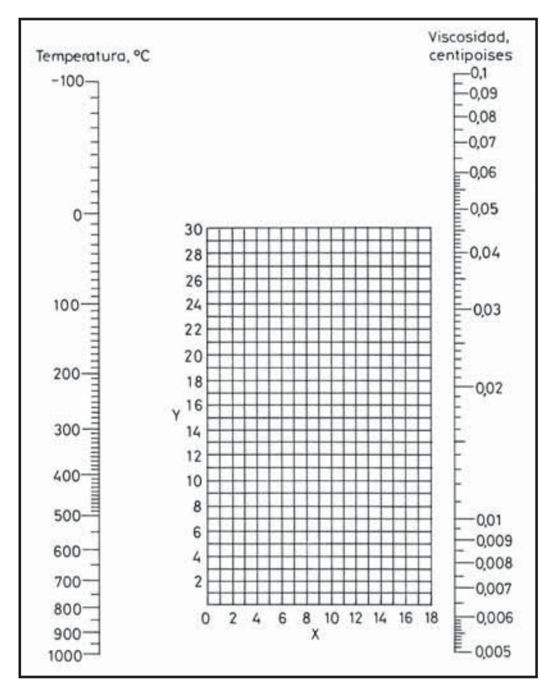


Tabla 4.5 Viscosidad de gases y vapores a 1 atm

Gas o vapor	*X*	*Y*	*Gas o vapor*	*X*	*Y*
Acetato de etilo	8,5	13,2	Freón-11	10,6	15,1
Acetileno	9,8	14,9	Freón-12	11,1	16,0
Acetona	8,9	13,0	Freón-21	10,8	15,3
Ácido acético	7,7	14,3	Freón-22	10,1	17,0
Agua	8,0	16,0	Freón-113	11,3	14,0
Aire	11,0	20,0	Helio	10,9	20,5
Amoníaco	8,4	16,0	Hexeno	8,6	11,8
Argón	10,5	24,0	Hidrógeno	11,2	12,4
Benceno	8,5	13,2	$H_2 + N_2$ (3 : 1)	11,2	17,2
Bromo	8,9	19,2	Iodo	9,0	18,4
Bromuro de hidrógeno	8,8	20,9	Ioduro de hidrógeno	9,0	21,3
Buteno-1	9,2	13,7	Mercurio	5,3	22,9
Buteno-2	8,9	13,0	Metano	9,9	15,5
Cianógeno	9,2	15,2	Metanol	8,5	15,6
Cianuro de hidrógeno	9,8	14,9	Monóxido de carbono	11,0	20,0
Ciclohexano	9,2	12,0	Nitrógeno	10,6	20,0
Cloro	9,0	18,4	Óxido nítrico	10,9	20,5
Cloroformo	8,9	15,7	Óxido nitroso	8,8	19,0
Cloruro de etilo	8,5	15,6	Oxígeno	11,0	21,3
Cloruro de hidrógeno	8,8	18,7	Pentano	7,0	12,8
Cloruro de nitrósilo	8,0	17,6	Propano	9,7	12,9
Dióxido de azufre	9,6	17,0	Propanol	8,4	13,4
Dióxido de carbono	9,5	18,7	Propeno	9,0	13,8
Etano	9,1	14,5	Sulfuro de carbono	8,0	16,0
Etanol	9,2	14,2	Sulfuro de hidrógeno	8,6	18,0
Éter etílico	8,9	13,0	Tolueno	8,6	12,4
Etileno	9,5	15,1	Trimetilbutano (2,3,3)	9,5	10,5
Flúor	7,3	23,8	Xenón	9,3	23,0

Tabla 4.5 Viscosidad de gases y vapores a 1 atm (continuación) (coordenadas X e Y para determinar la viscosidad según la gráfica)

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35 \times \beta^4) \times \frac{PD}{P1 \times \kappa}$$

$P1$ es la presión del fluido aguas arriba de la placa.

5. Se calcula el coeficiente de descarga C según la fórmula:

$$C = 0,5959 + 0,0312 \times \beta^{2,1} - 0,184 \times \beta^8 + 0,0029 \times \beta^{2,5} \times \left(\frac{10^6}{\mathrm{Re}_D}\right)^{0,75} + \left(\frac{2,286}{D}\right) \times \frac{\beta^4}{1-\beta^4} \times \left(\frac{0,85598}{D}\right) \times \beta^3$$

Si el diámetro D a la temperatura de paso del fluido es menor o igual a 58,615 mm, entonces el coeficiente 2,286 que afecta al término $\beta^4/(1 - \beta^4)$ cambiará a 0,039.

6. A continuación, se calcula un nuevo valor de β mediante la fórmula siguiente, en la que F_s es un factor de corrección que se utiliza cuando el fluido es vapor de agua (líquido y gas $F_s = 1$) con un contenido de humedad de $W1\%$:

$$F_s = 1 + 0,0074 \times W1 \text{ (limitado para } W1\% \leq 5\ \%)$$

$$\beta = \frac{2847,05 \times Q_m}{D^2 \times \varepsilon \times C \times F_s} \sqrt{\frac{1-\beta^4}{PD \times \rho}}$$

Con el valor calculado de β, se repiten los cálculos de los puntos 4 a 6 hasta que el valor obtenido de β se aproxima a la centésima.

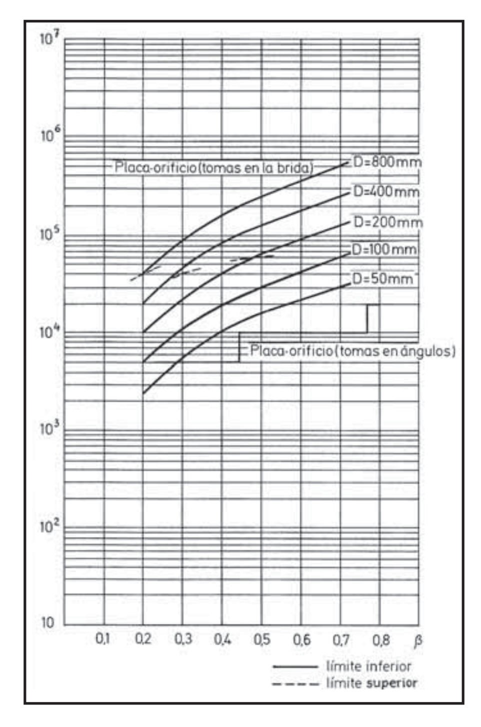


Figura 4.12 Límites superior e inferior del número de Reynolds

7. El diámetro del orificio a la temperatura de servicio del fluido es:

$$d = \beta \times D$$

8. El diámetro del orificio a mecanizar, siendo H el coeficiente de dilatación de la placa, es:

$$d_m = \frac{d}{1 + H \times (t - t_0)}$$

La marcha del cálculo de la Tobera ISA 1932 y del tubo Venturi es parecida, con la diferencia de los valores de ε en el paso 4 y de C en el paso 5. El error global de la medida en un elemento deprimógeno vendrá dado por:

$$Error\ global = \frac{\Delta Q_m}{Q_m} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + 4\frac{\beta^4\sqrt{1-\beta^4}}{C} \times \left(\frac{\Delta D}{d}\right)^2 + 4\left[1 + \frac{\beta^4\sqrt{1-\beta^4}}{C}\right] \times \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \frac{1}{4} \times \left(\frac{\Delta(PD)}{PD}\right)^2 + \frac{1}{4} \times \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^2}$$

El error en el coeficiente de descarga C es de ± 0,6% en la placa-orificio, ± 0,8% en la tobera ISO 1932, y entre ± 0,7% y ± 1,5% en el tubo Venturi.

El error en el factor de expansión ε es de ± $4(\Delta P/P)$% en la placa-orificio, ± $2(\Delta P/P)$% en la tobera ISO 1932, y del ± $(4 + 100 \times \beta^8) \times (\Delta P/P)$% en el tubo Venturi, todos ellos dentro de las limitaciones de β que van del 0,3% al 0,8%.

El error en los diámetros D (tubería) y d (orificio) es el valor medio cuadrático de las medidas micrométricas realizadas. El error en la presión diferencial P_1 - P_2 viene dado por la precisión del aparato de medida que es típicamente del ± 0,1% al ± 0,5%.

El error en la medida de la densidad viene dado por el instrumento de densidad o los aparatos de compensación de presión y temperatura, en cuyo caso se añade la media cuadrática de las precisiones correspondientes.

A continuación figura un programa de ordenador para el cálculo de la placa-orificio, la tobera ISA 1932, la tobera ASME de radio largo y el tubo Venturi, con ejemplos de cálculo.

```
10 LOCATE 1, 1: PRINT "CALCULO DE ELEMENTOS DEPRIMOGENOS según la Norma
   ISO-5167-1980 © A.Creus"
20 REM- Placa-orificio con tomas en la brida, Tobera ISA 1932 (Europa),
   Tobera ASME de Radio largo, y Tubo Venturi
30 LOCATE 1, 70: COLOR 0, 7: PRINT "ESC"; : COLOR 7, 0: LOCATE 1, 74:
   PRINT "MENU"; : LOCATE 1, 60, 1, 1, 6
34 LOCATE 2, 1: PRINT "PLACA-ORIFICIO(P); TOBERA ISO 1932(T); TOBERA ASME
   DE RADIO LARGO(U)";
35 LOCATE 3, 1: PRINT "TUBO VENTURI - FORJADO(F); MECANIZADO(M); CHAPA
   SOLDADA(C); "; VENT$;
36 LOCATE 4, 1: PRINT "LIQUIDO (L); CAS (G); VAPOR (V)";
39 LOCATE 3, 70, 1, 1, 6
40 DEPRI$ = INKEY$: IF DEPRI$ = "" THEN 40
41 IF DEPRI$ = "P" OR DEPRI$ = "p" THEN ELEM% = 1: LOCATE 2, 1: COLOR 0,
   7: PRINT "PLACA-ORIFICIO"; : COLOR 7, 0: GOTO 60
```

```
42 IF DEPRI$ = "T" OR DEPRI$ = "t" THEN ELEM% = 2: LOCATE 2, 20: COLOR 0,
   7: PRINT "TOBERA ISO 1932"; : COLOR 7, 0: GOTO 60
43 IF DEPRI$ = "U" OR DEPRI$ = "u" THEN ELEM% = 3: LOCATE 2, 33: COLOR 0,
   7: PRINT "TOBERA ASME DE RADIO LARGO"; : COLOR 7, 0: GOTO 60
45 IF DEPRI$ = "F" OR DEPRI$ = "f" THEN ELEM% = 4: LOCATE 3, 1: COLOR 0,
   7: PRINT "TUBO VENTURI"; : COLOR 7, 0: LOCATE 3, 16: COLOR 0, 7: PRINT
   "FORJADO"; : COLOR 7, 0: GOTO 60
46 IF DEPRI$ = "M" OR DEPRI$ = "m" THEN ELEM% = 5: LOCATE 3, 1: COLOR 0,
   7: PRINT "TUBO VENTURI"; : COLOR 7, 0: LOCATE 3, 29: COLOR 0, 7: PRINT
   "MECANIZADO"; : COLOR 7, 0: GOTO 60
47 IF DEPRI$ = "C" OR DEPRI$ = "c" THEN ELEM% = 6: LOCATE 3, 1: COLOR 0,
   7: PRINT "TUBO VENTURI"; : COLOR 7, 0: LOCATE 3, 45: COLOR 0, 7: PRINT
   "CHAPA SOLDADA"; : COLOR 7, 0: GOTO 60
48 IF DEPRI$ = CHR$(27) AND CU% = 8 THEN LOCATE , , 0: CLS : SCREEN 0:
   CHAIN "PROCON01"
49 IF DEPRI$ = CHR$(27) AND CU% = 9 THEN LOCATE , , 0: CLS : SCREEN 0:
   CHAIN "PROCON02"
50 BEEP: GOTO 40
60 LOCATE 4, 70, 1, 1, 6
62 FLUI$ = INKEY$: IF FLUI$ = "" THEN 62
64 IF FLUI$ = "L" OR FLUI$ = "l" THEN FLUI% = 1: LOCATE 4, 1: COLOR 0, 7:
   PRINT "LIQUIDO"; : COLOR 7, 0: GOTO 70
65 IF FLUI$ = "G" OR FLUI$ = "g" THEN FLUI% = 2: LOCATE 4, 14: COLOR 0,
   7: PRINT "GAS"; : COLOR 7, 0: GOTO 70
66 IF FLUI$ = "V" OR FLUI$ = "v" THEN FLUI% = 3: LOCATE 4, 23: COLOR 0,
   7: PRINT "VAPOR"; : COLOR 7, 0: GOTO 70
67 BEEP: GOTO 60
70 'IF FLUI% = 1 THEN 71 ELSE 110
71 LOCATE 5, 1: PRINT "¨TEMPERATURA DE SERVICIO en "; CHR$(248); "C"; : ' T1
72 LOCATE 6, 1: PRINT "¨TEMPERATURA AMBIENTE en "; CHR$(248); "C"; : 'TO
73 LOCATE 7, 1: PRINT "¨DENSIDAD DEL FLUIDO en Kg/m3"; : 'DENSI
74 LOCATE 8, 1: PRINT "¨"; CHR$(237); " medio DE LA TUBERIA A TEMPERATURA
   AMBIENTE en mm"; : ' DO
75 LOCATE 9, 1: PRINT "¨COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TUBERIA /";
   CHR$(248); "C"; : ' H
76 IF ELEM% = 1 THEN LOCATE 10, 1: PRINT "¨COEFICIENTE DE DILATACION DE
   LA PLACA /"; CHR$(248); "C"; : ' HP
78 IF ELEM% = 2 OR ELEM% = 3 THEN LOCATE 10, 1: PRINT "¨COEFICIENTE DE
   DILATACION DE LA TOBERA /"; CHR$(248); "C"; : ' HP
79 IF ELEM% = 4 OR ELEM% = 5 OR ELEM% = 6 THEN LOCATE 10, 1: PRINT "¨CO
   EFICIENTE DE DILATACION DEL TUBO VENTURI /"; CHR$(248); "C"; : ' HP
80 LOCATE 11, 1: PRINT "¨CAUDAL MASA EN Kg/seg."; : ' QM
81 IF FLUI% = 2 OR FLUI% = 3 THEN LOCATE 12, 1: PRINT "¨COEFICIENTE ISEN
   TROPICO (Relaci¢n de Calores Espec¡ficos)"; : ' CAPA
82 IF FLUI% = 3 THEN LOCATE 13, 1: PRINT "HUMEDAD DEL VAPOR en % de agua
   (sobrecalentado y saturado es 0)"; : ' W1
83 LOCATE 14, 1: PRINT "¨VISCOSIDAD ABSOLUTA O DINAMICA DEL FLUIDO en
   centipoises"; : ' VIS
84 LOCATE 15, 1: PRINT "¨PRESION DIFERENCIAL en bar para el CAUDAL MAXIMO";
   : ' PD
```

```
85 LOCATE 16, 1: PRINT "¨PRESION ESTATICA ABSOLUTA EN LA TOMA DE ALTA
   PRESION en bar"; : ' P1
88 LOCATE 5, 70, 1, 1, 6: NMAX = 3000: LLOND% = 3: GOSUB 2250: T1 =
   VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 88
89 LOCATE 6, 70, 1, 1, 6: NMAX = 100: LLOND% = 1: GOSUB 2250: T0 =
   VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 89
90 LOCATE 7, 70, 1, 1, 6: NMAX = 15000: LLOND% = 3: GOSUB 2250: DENSI =
   VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 90
91 LOCATE 8, 70, 1, 1, 6: NMAX = 10000: LLOND% = 3: GOSUB 2250: D0 =
   VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 91
92 LOCATE 9, 70, 1, 1, 6: NMAX = 1: LLOND% = 8: GOSUB 2250: H = VAL(XZ$):
   IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 92
93 IF ELEM% = 1 THEN LOCATE 10, 70, 1, 1, 6: NMAX = 1: LLOND% = 8: GOSUB
   2250: HP = VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 93
96 IF ELEM% = 2 OR ELEM% = 3 THEN LOCATE 10, 70, 1, 1, 6: NMAX = 1:
   LLOND% = 8: GOSUB 2250: HP = VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 96
97 IF ELEM% = 4 OR ELEM% = 5 OR ELEM% = 6 THEN LOCATE 10, 70, 1, 1, 6:
   NMAX = 1: LLOND% = 8: GOSUB 2250: HP = VAL(XZ$): IF XZ$ = ""
   THEN BEEP: GOTO 97
98 LOCATE 11, 70, 1, 1, 6: NMAX = 10000: LLOND% = 4: GOSUB 2250: QM =
   VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 98
99 IF FLUI% = 2 OR FLUI% = 3 THEN LOCATE 12, 70, 1, 1, 6: NMAX = 100:
   LLOND% = 4: GOSUB 2250: CAPA = VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP:
   GOTO 99
100 IF FLUI% = 3 THEN LOCATE 13, 70, 1, 1, 6: NMAX = 100: LLOND% = 4: GO
    SUB 2250: W1 = VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 100
101 LOCATE 14, 70, 1, 1, 6: NMAX = 10000: LLOND% = 6: GOSUB 2250: VIS =
    VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 101
102 LOCATE 15, 70, 1, 1, 6: NMAX = 100: LLOND% = 4: GOSUB 2250: PD =
    VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 102
103 LOCATE 16, 70, 1, 1, 6: NMAX = 1000: LLOND% = 4: GOSUB 2250: P1 =
    VAL(XZ$): IF XZ$ = "" THEN BEEP: GOTO 103
200 D = D0 * (1 + H * (T1 - T0))
210 RED = (1273200! * QM) / (VIS * D): REM- NUMERO DE REYNOLDS
220 FS = 1: IF FLUI% = 3 THEN FS = 1 + .0074 * W1: REM- FACTOR DE CORRECCION
    DEL VAPOR
230 BETA = (QM ^ 2 / ((4.6 * 10 ^ -10 * D ^ 4 * PD * DENSI) + QM ^ 2)) ^ .25
240 IF ELEM% = 1 THEN 250 ELSE 350
250 REM- PLACA-ORIFICIO CON TOMAS EN LA BRIDA
260 IF FLUI% = 1 THEN EPSILON = 1 ELSE EPSILON = 1 - (.41 + .35 * BETA ^
    4) * (PD / P1) * CAPA ^ -1
270 IF D > 58.615 THEN C = .5959 + .0312 * BETA ^ 2.1 - .184 * BETA ^ 8 +
    .0029 * BETA ^ 2.5 * (10 ^ 6 / RED) ^ .75 + (2.286 / D) * BETA ^ 4 *
    (1 - BETA ^ 4) ^ -1 - (.85598 / D) * BETA ^ 3
275 IF D <= 58.615 THEN C = .5959 + .0312 * BETA ^ 2.1 - .184 * BETA ^ 8
    + .0029 * BETA ^ 2.5 * (10 ^ 6 / RED) ^ .75 + (.039 / D) * BETA ^ 4 *
    (1 - BETA ^ 4) ^ -1 - (.85598 / D) * BETA ^ 3
280 BETA1 = (2847.05 * QM * (SQR(1 - BETA ^ 4)) / (D ^ 2 * EPSILON * C *
    FS * (SQR(DENSI * PD)))) ^ .5
290 IF ABS((BETA - BETA1) / BETA1) > .0001 THEN BETA = BETA1: GOTO 250
300 D1 = D * BETA1
```

```
310 D1M = D1 / (1 + HP * (T1 - T0))
320 PRINT : COLOR 2, 0: PRINT "RESULTADOS DEL CALCULO": PRINT "----------
    ------------": COLOR 7, 0
330 PRINT "N§ de REYNOLDS = "; RED: PRINT "BETA (d/D) = "; BETA: PRINT
    "DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= "; D1: PRINT "DIAMETRO DE MECANIZACION
    DEL ORIFICIO (mm) "; D1M
340 GOTO 2500
350 IF ELEM% = 2 THEN 360 ELSE 460
360 REM- TOBERA ISA 1932 (EUROPA)
370 IF FLUID$ = "L" OR FLUID$ = "l" THEN EPSILON = 1 ELSE K = (P1 - PD) /
    P1: EPSILON = ((CAPA * K ^ (2 / CAPA) / (CAPA - 1)) * ((1 - BETA ^ 4)
    / (1 - BETA ^ 4 * K ^ (2 / CAPA))) * ((1 - K ^ ((CAPA - 1) / CAPA)) /
    (1 - K))) ^ .5
380 C = .99 - .2262 * BETA ^ 4.1 + (.000215 - .001125 * BETA + .00249 *
    BETA ^ 4.7) * (10 ^ 6 / RED) ^ 1.15
390 BETA1 = (2847.05 * QM * SQR(1 - BETA ^ 4) / (D ^ 2 * EPSILON * C * FS
    * SQR(DENSI * PD))) ^ .5
400 'PRINT ABS((BETA1 - BETA) / BETA1)
401 IF ABS((BETA1 - BETA) / BETA1) > .0001 THEN BETA = BETA1: GOTO 360
410 D1 = D * BETA1
420 D1M = D1 / (1 + HP * (T1 - T0))
430 PRINT : COLOR 2, 0: PRINT "RESULTADOS DEL CALCULO": PRINT "----------
    ------------": COLOR 7, 0
440 PRINT "N§ de REYNOLDS = "; RED: PRINT "BETA (d/D) = "; BETA: PRINT
    "DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= "; D1: PRINT "DIAMETRO DE MECANIZACION
    DEL ORIFICIO (mm) "; D1M
450 GOTO 2500
460 IF ELEM% = 3 THEN 470 ELSE 570
470 REM- TOBERA ASME RADIO LARGO (AMERICA)
480 IF FLUI% = 1 THEN EPSILON = 1 ELSE K = (P1 - PD) / P1: EPSILON =
    ((CAPA * K ^ (2 / CAPA) / (CAPA - 1)) * ((1 - BETA ^ 4) / (1 - BETA ^
    4 * K ^ (2 / CAPA))) * ((1 - K ^ ((CAPA - 1) / CAPA)) / (1 - K))) ^ .5
490 C = .9965 - .00653 * BETA ^ .5 + (10 ^ 6 / RED) ^ .5
500 BETA1 = (2847.05 * QM * SQR(1 - BETA ^ 4) / (D ^ 2 * EPSILON * C * FS
    * SQR(DENSI * PD))) ^ .5
510 IF ABS((BETA1 - BETA) / BETA1) > .0001 THEN BETA = BETA1: GOTO 470
520 D1 = D * BETA1
530 D1M = D1 / (1 + HP * (T1 - T0))
540 PRINT : COLOR 2, 0: PRINT "RESULTADOS DEL CALCULO": PRINT "----------
    ------------": COLOR 7, 0
550 PRINT "N§ de REYNOLDS = "; RED: PRINT "BETA (d/D) = "; BETA: PRINT
    "DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= "; D1: PRINT "DIAMETRO DE MECANIZACION
    DEL ORIFICIO (mm) "; D1M
560 GOTO 2500
570 IF ELEM% = 4 OR ELEM% = 5 OR ELEM% = 6 THEN 580 ELSE BEEP: GOTO 26
580 REM- TUBO VENTURI
590 IF FLUI% = 1 THEN EPSILON = 1 ELSE K = (P1 - PD) / P1: EPSILON =
    ((CAPA * K ^ (2 / CAPA) / (CAPA - 1)) * ((1 - BETA ^ 4) / (1 - BETA ^
    4 * K ^ (2 / CAPA))) * ((1 - K ^ ((CAPA - 1) / CAPA)) / (1 - K))) ^ .5
600 IF ELEM% = 4 THEN C = .984
```

```
610 IF ELEM% = 5 THEN C = .995
620 IF ELEM% = 6 THEN C = .985
630 BETA1 = (2847.05 * QM * SQR(1 - BETA ^ 4) / (D ^ 2 * EPSILON * C * FS
    * SQR(DENSI * PD))) ^ .5
640 IF ABS((BETA1 - BETA) / BETA1) > .0001 THEN BETA = BETA1: GOTO 250
650 D1 = D * BETA1
660 D1M = D1 / (1 + HP * (T1 - T0))
670 PRINT : COLOR 2, 0: PRINT "RESULTADOS DEL CALCULO": PRINT "----------
    -----------": COLOR 7, 0
680 PRINT "N§ de REYNOLDS = "; RED: PRINT "BETA (d/D) = "; BETA: PRINT
    "DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= "; D1: PRINT "DIAMETRO DE MECANIZACION
    DEL ORIFICIO (mm) "; D1M
690 GOTO 2500
2250 XZ$ = "": REM- SUBRUTINA ENTRADA NUMEROS CON DECIMALES + O -
2260 CONTA% = 0: PUNT% = 0
2270 X$ = INKEY$: IF X$ = "" THEN 2270
2280 COL = POS(0)
2290 IF X$ = CHR$(13) THEN RETURN
2300 IF LEN(XZ$) = 0 THEN CONTA% = CONTA% + 1: PUNT% = 0: GOTO 2330
2310 IF X$ = CHR$(27) AND CU% = 8 THEN LOCATE , , 0: CLS : SCREEN 0:
     CHAIN "PROCON01"
2311 IF X$ = CHR$(27) AND CU% = 9 THEN LOCATE , , 0: CLS : SCREEN 0:
     CHAIN "PROCON02"
2320 IF X$ = CHR$(8) AND LEN(XZ$) >= 1 THEN LOCATE , COL - 1: PRINT " ";
     : LOCATE , COL - 1: XZ$ = LEFT$(XZ$, LEN(XZ$) - 1)
2330 IF CONTA% = 2 THEN CONTA% = 0: GOTO 2340
2340 IF X$ < " " OR X$ > "z" THEN 2270: REM-DETECTA LA PULSACION DE ALT Y
     NO ESCRIBE
2350 IF ASC(X$) = 45 AND XZ$ = "" THEN 2400
2360 IF ASC(X$) <> 46 THEN 2390
2370 IF ASC(X$) = 46 THEN PUNT% = PUNT% + 1: IF PUNT% >= 2 THEN PUNT% =
     2: REM-PERMITE ESCRIBIR SOLO UN PUNTO PARA LOS DECIMALES
2380 IF PUNT% = 1 THEN 2400 ELSE 2390
2390 IF ASC(X$) < 48 OR ASC(X$) > 57 THEN 2270: REM-DETECTA LAS LETRAS
     PULSADAS Y NO LAS ESCRIBE
2400 XZ$ = XZ$ + X$: PRINT X$;
2410 IF VAL(XZ$) > NMAX THEN BEEP: LOCATE , COL - LEN(XZ$): FOR BOR = 1
     TO LEN(XZ$) + 1: PRINT " "; : NEXT BOR: LOCATE , COL - LEN(XZ$) + 1:
     XZ$ = "": GOTO 2270
2420 IF LEN(XZ$) - LEN(STR$(INT(VAL(XZ$)))) > LLOND% THEN BEEP: LOCATE ,
     COL - LEN(XZ$): FOR BOR = 1 TO LEN(XZ$) + 1: PRINT " "; : NEXT BOR:
     LOCATE , COL - LEN(XZ$) + 1: XZ$ = "": PUNT% = 0: GOTO 2270
2430 IF COL >= 78 THEN BEEP: LOCATE , COL - LEN(XZ$): FOR BOR = 1 TO
     LEN(XZ$) + 1: PRINT " "; : NEXT BOR: LOCATE , COL - LEN(XZ$) +
     1: XZ$ = "": PUNT% = 0: GOTO 2270
2440 GOTO 2270
2500 LOCATE 25, 1: PRINT "PULSE CUALQUIER TECLA para el cálculo de otro
     elemento"; : WHILE INKEY$ = "": WEND
2510 GOTO 26
```

```
2520 REM-TRATAMIENTO DE ERRORES
2530 SOUND 500, .5: IF ERR = 5 OR ERR = 6 THEN 2532 ELSE 2540
2532 LOCATE 19, 22: PRINT "DATOS INCORRECTOS - Repita el cálculo";
2533 LOCATE 21, 22: PRINT "(Pulse cualquier tecla para continuar)";
2534 DO WHILE INKEY$ = "": LOOP: RESUME 26
2540 BEEP: SCREEN 0: RESUME 26
```

Ejemplos de cálculo

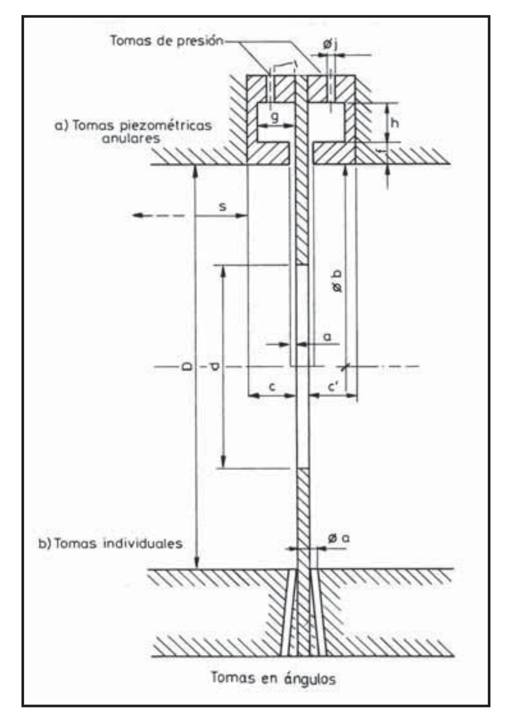
```
CALCULO DE ELEMENTOS DEPRIMOGENOS según la Norma ISO-5167-1980 ESC MENU
PLACA-ORIFICIO(P); TOBERA ISO 1932(T); TOBERA ASME DE RADIO LARGO(U)
TUBO VENTURI - FORJADO(F); MECANIZADO(M); CHAPA SOLDADA(C);
LIQUIDO (L); CAS (G); VAPOR (V)                                     L
¿TEMPERATURA DE SERVICIO en °C                                      15
¿TEMPERATURA AMBIENTE en °C                                         15
¿DENSIDAD DEL FLUIDO en Kg/m3                                       1000
¿Ø medio DE LA TUBERIA A TEMPERATURA AMBIENTE en mm                 600
¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TUBERIA /°C                        .0000117
¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA PLACA /°C                          .000016
¿CAUDAL MASA EN Kg/seg.                                             448
¿VISCOSIDAD ABSOLUTA O DINAMICA DEL FLUIDO en centipoises           .00114
¿PRESION DIFERENCIAL en bar para el CAUDAL MAXIMO                   .2
¿PRESION ESTATICA ABSOLUTA EN LA TOMA DE ALTA PRESION en bar        1.02
RESULTADOS DEL CALCULO
----------------------
Nº de REYNOLDS = 8.339088E+08
BETA (d/D) = .6191493
DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= 371.4749
DIAMETRO DE MECANIZACION DEL ORIFICIO (mm) 371.4749

CALCULO DE ELEMENTOS DEPRIMOGENOS según la Norma ISO-5167-1980 ESC MENU
PLACA-ORIFICIO(P); TOBERA ISO 1932(T); TOBERA ASME DE RADIO LARGO(U)
TUBO VENTURI - FORJADO(F); MECANIZADO(M); CHAPA SOLDADA(C);
LIQUIDO (L); CAS (G); VAPOR (V)                                     V
¿TEMPERATURA DE SERVICIO en °C                                      250
¿TEMPERATURA AMBIENTE en °C                                         15
¿DENSIDAD DEL FLUIDO en Kg/m3                                       4.6
¿Ø medio DE LA TUBERIA A TEMPERATURA AMBIENTE en mm                 150
¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TUBERIA /°C                        .0000117
```

```
¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TOBERA /°C                          .000016
¿CAUDAL MASA EN Kg/seg.                                              2.83
¿COEFICIENTE ISENTROPICO (Relación de Calores Específicos)           1.3
HUMEDAD DEL VAPOR en % de agua (sobrecalentado y saturado es 0)      0
¿VISCOSIDAD ABSOLUTA O DINAMICA DEL FLUIDO en centipoises            .018
¿PRESION DIFERENCIAL en bar para el CAUDAL MAXIMO                    .2
¿PRESION ESTATICA ABSOLUTA EN LA TOMA DE ALTA PRESION en bar         11
RESULTADOS DEL CALCULO
----------------------
Nº de REYNOLDS = 1330843
BETA (d/D) = .6035718
DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= 90.78593
DIAMETRO DE MECANIZACION DEL ORIFICIO (mm) 90.44586
PULSE CUALQUIER TECLA para el cálculo de otro elemento

CALCULO DE ELEMENTOS DEPRIMOGENOS según la Norma ISO-5167-1980 ESC MENU
PLACA-ORIFICIO(P); TOBERA ISO 1932(T); TOBERA ASME DE RADIO LARGO(U)
TUBO VENTURI - FORJADO(F); MECANIZADO(M); CHAPA SOLDADA(C);
LIQUIDO (L); GAS (G); VAPOR (V)                                      G
¿TEMPERATURA DE SERVICIO en °C                                       15
¿TEMPERATURA AMBIENTE en °C                                          15
¿DENSIDAD DEL FLUIDO en Kg/m3                                        .5
¿Ø medio DE LA TUBERIA A TEMPERATURA AMBIENTE en mm                  300
¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TUBERIA /°C                         .0000117
¿COEFICIENTE DE DILATACION DEL TUBO VENTURI /°C                      .000016
¿CAUDAL MASA EN Kg/seg.                                              .3425
¿COEFICIENTE ISENTROPICO (Relación de Calores Específicos)           1.31
¿VISCOSIDAD ABSOLUTA O DINAMICA DEL FLUIDO en centipoises            .012
¿PRESION DIFERENCIAL en bar para el CAUDAL MAXIMO                    .004
¿PRESION ESTATICA ABSOLUTA EN LA TOMA DE ALTA PRESION en bar         1.007
RESULTADOS DEL CALCULO
----------------------
Nº de REYNOLDS = 121130.8
BETA (d/D) = .6087617
DIAMETRO DEL ORIFICIO d (mm)= 182.6207
DIAMETRO DE MECANIZACION DEL ORIFICIO (mm) 182.6207
```

En las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 pueden verse dimensiones constructivas del diafragma, la tobera y el tubo Venturi.



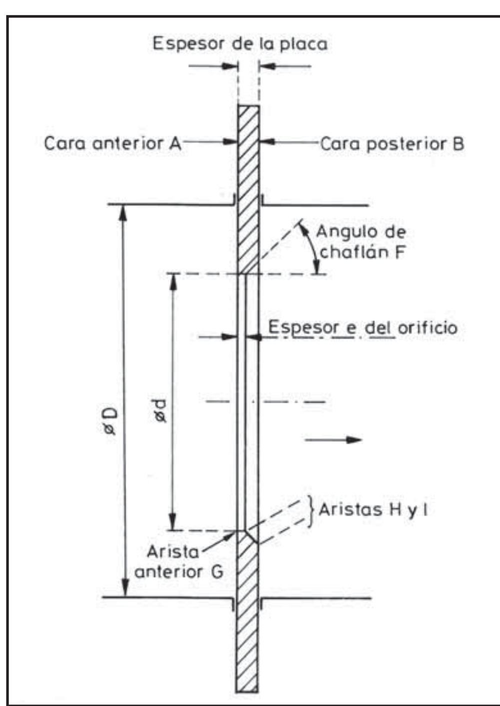


Figura 4.13 *Diafragma*

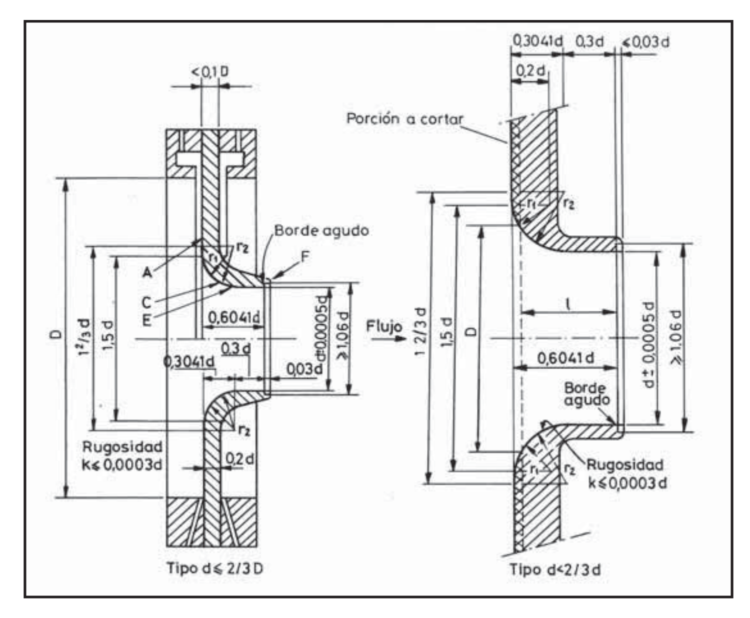


Figura 4.14a *Tobera*

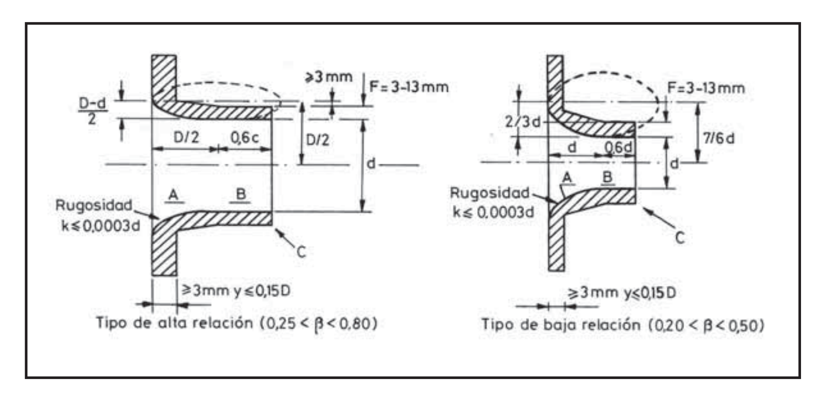


Figura 4.14b Tobera (continuación)

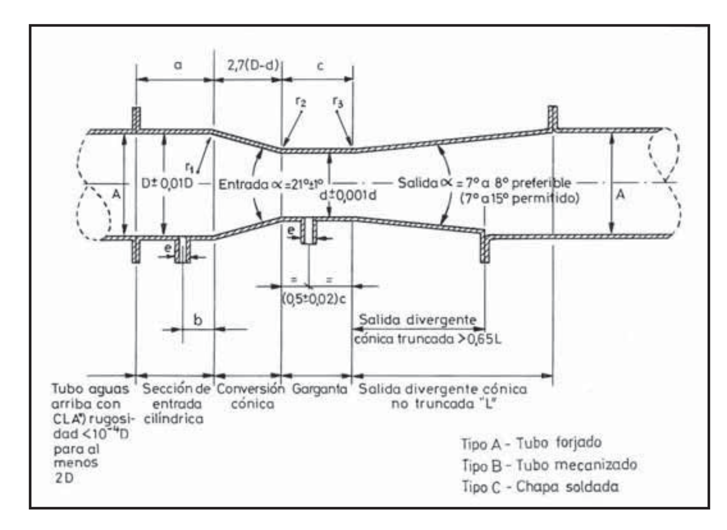


Figura 4.15 Tubo Venturi

En la fórmula general simplificada del caudal:

$$Q_v = K\sqrt{\frac{h}{\rho}}$$

se observa que la medida depende de la densidad del fluido, por lo cual, si ésta cambia variará la lectura del instrumento. Por otro lado, cuando se realiza el cálculo se parte de unos datos previos que se toman lo más próximos posibles a los reales de funcionamiento.

Si la densidad real se aparta de la tomada para el cálculo, habrá que corregirla con el factor siguiente:

El caudal real es:

$$Q_v = K\sqrt{\frac{h}{\rho_r}}$$

siendo ρ_r la densidad real.

El caudal leído es:

$$Q_c = K\sqrt{\frac{h}{\rho_c}}$$

siendo ρ_c la densidad que se tomó para calcular el diafragma. Luego:

$$Q_r = Q_c\sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_r}}$$

que da la expresión del caudal real en función del caudal leído con el factor de corrección:

$$\sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_r}}$$

En el caso de un líquido, la corrección se realiza fácilmente ya que es fácil medir ρ_r.

En el caso de un vapor saturado, basta conocer su presión o su temperatura para obtener, mediante tablas, su densidad. Si el vapor es recalentado, será preciso conocer su presión y su temperatura.

Cuando el fluido a medir es un gas, su densidad se determina a partir de su composición realizada por análisis químicos según la fórmula:

$$\rho_{r0} = \sum \rho_{ng} \times V_g$$

en la que:

ρ_{r0} = densidad de la mezcla del gas real a 0 °C y 760 mm Hg

ρ_{ng} = densidad del gas g a 0 °C y 760 mm Hg

V_g = % en volumen del gas g

Si el gas es ideal, su densidad ρ_r a la temperatura y presión a su paso por el diafragma es:

$$\rho_r = \rho_{r0}\frac{P_r}{1,013} \times \frac{273}{273 + t_r}$$

en la que:

P_r = presión absoluta real, en bar

t_r = temperatura real, en °C

Mientras que la densidad del gas calculada era:

$$\rho_c = \rho_{c0}\frac{P_c}{1,013} \times \frac{273}{273 + t_c}$$

donde se deduce que el valor del caudal Q_r, en m^3/h, en función del caudal Q_c leído es:

$$Q_r = Q_c\sqrt{\frac{\rho_{c0}}{\rho_{r0}} \times \frac{P_c}{P_r} \times \frac{273 + t_r}{273 + t_c}}$$

Si la humedad del gas que se ha tomado en el cálculo era h_c, con la indicación del instrumento expresada en Nm^3/h de gas seco, y una vez puesta en marcha la instalación, la humedad real resulta ser de h_r, el factor de corrección correspondiente será:

$$F = \frac{100 - h_r}{100 - h_c}$$

es decir, el cociente entre el porcentaje de gas seco que realmente contiene el gas y el porcentaje de gas seco tomado en el cálculo.

Si la temperatura del fluido varía mucho con relación a la considerada en el cálculo, el diámetro del orificio calculado se desviará del diámetro real en las condiciones de servicio. El factor de corrección del caudal será:

$$F = \left(\frac{d_r}{d_c}\right)^2$$

siendo:

d_r =diámetro real

d_c = diámetro calculado

debido a que en la fórmula del caudal el diámetro figura elevado a la potencia 2.

Si el gas lleva partículas en suspensión que se depositan en las paredes de la tubería, en particular en su parte baja, el diámetro interior de la tubería se reduce gradualmente afectando a la lectura del caudal. Si la limpieza periódica de la tubería es difícil, la mejor solución es determinar un coeficiente de corrección aproximado del caudal, partiendo de la base de que las partículas del fluido se van depositando proporcionalmente al tiempo de funcionamiento.

De este modo, determinado el diámetro D_T de la tubería al cabo del tiempo T mediante el desmontaje del elemento, la expresión general que da el diámetro de la tubería en el tiempo t es:

$$D_t = D_0 - \frac{1}{T}(D_0 - D_T)$$

con lo que:

D_0 = diámetro inicial de la tubería

D_T = diámetro de la tubería al cabo del tiempo t

Siendo la fórmula general:

$$Q_v = CE\varepsilon \times \frac{\pi}{4}\frac{D^2\beta^2}{10^6} \times \sqrt{2\frac{P_a - P_c}{\rho_0} \times 10^5}\, m^3 / s$$

el factor de corrección correspondiente será:

$$F = \frac{(CE\varepsilon\beta^2 D^2)\ al\ cabo\ del\ tiempo\ t}{(CE\varepsilon\beta^2 D^2)\ valores\ iniciales}$$

4.1.1.4 Tubo Pitot

El *tubo Pitot* fue ideado por Henri de Pitot (1695-1771) y mide la diferencia entre la presión total y la presión estática, o sea, la presión dinámica, la cual es proporcional al cuadrado de la velocidad (figura 4.16). La ecuación correspondiente es:

$$\frac{P_2}{\rho} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2}$$

en la que:

P_2 = presión de impacto o total absoluta en el punto donde el líquido anula su velocidad

P_1 = presión estática absoluta en el fluido

ρ = densidad

V_1 = velocidad del fluido en el eje del impacto

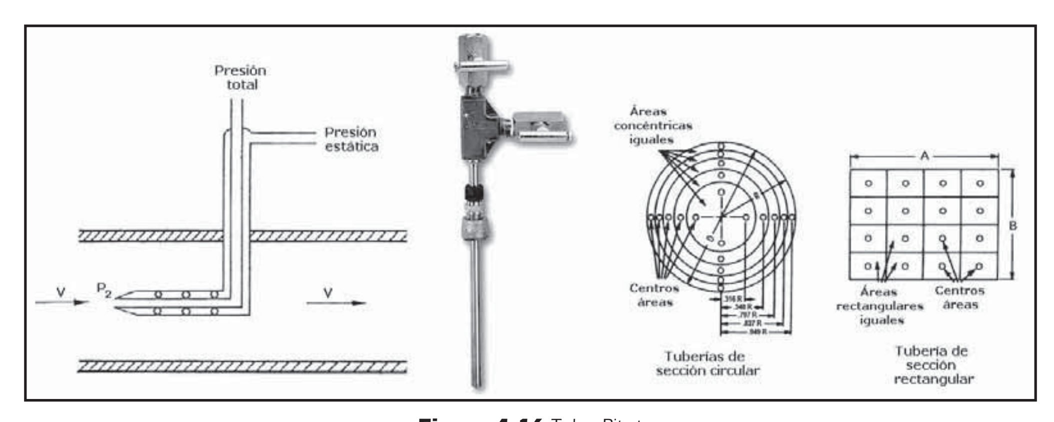


Figura 4.16 Tubo Pitot

De aquí se deduce:

$$V_1 = \sqrt{\frac{(P_2 - P_1)2}{\rho}}$$

o bien introduciendo un coeficiente de velocidad C para tener en cuenta la irregular distribución de velocidades, la rugosidad de la tubería, etc., resulta:

$$V_1 = C\sqrt{\frac{(P_2 - P_1)2}{\rho}\pi}$$

El tubo Pitot es sensible a las variaciones en la distribución de velocidades en la sección de la tubería, de aquí que en su empleo es esencial que el flujo sea laminar, disponiéndolo en un tramo recto de tubería. Si el eje del tubo está en el centro de la tubería, se considera C = 0,9 y se obtiene una exactitud del orden del ± 2% al ± 5%.

Si se desea la máxima exactitud se efectúan las medidas con el tubo Pitot en los puntos centrales de áreas concéntricas iguales en las tuberías de sección circular (20 lecturas), o en áreas rectangulares

iguales en las tuberías de sección rectangular (de 16 a 64 lecturas) y se promedian las raíces cuadradas de las velocidades medidas. De este modo, puede obtenerse una exactitud del ± 2%.

Se emplea normalmente para la medición de grandes caudales de fluidos limpios con una baja pérdida de carga.

4.1.1.5 Tubo Annubar

El *tubo Annubar* (figura 4.17) es una innovación del tubo Pitot y consta de dos tubos, el de presión total y el de presión estática. El tubo que mide la presión total está situado a lo largo de un diámetro transversal de la tubería y consta de varios orificios de posición crítica, determinada por computador, que cubren cada uno la presión total en un anillo de área transversal de la tubería. Estos anillos tienen áreas iguales.

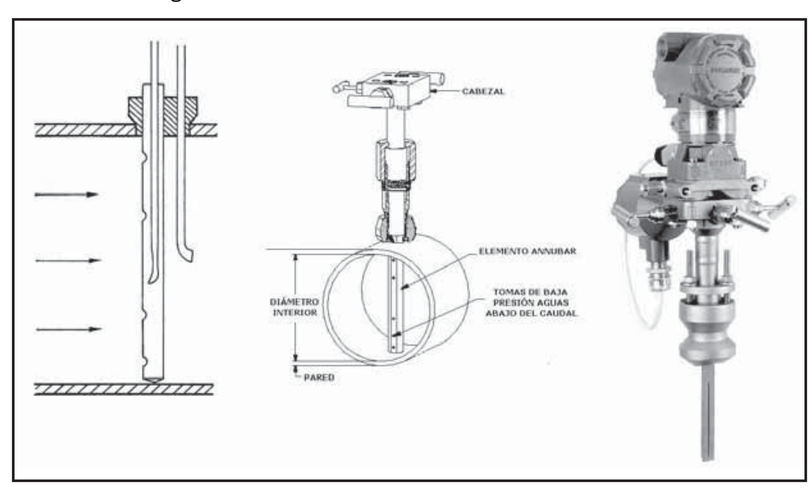


Figura 4.17 Tubo Annubar

El tubo que mide la presión estática se encuentra detrás del de presión total, con su orificio en el centro de la tubería y aguas abajo de la misma. El tubo Annubar es de mayor precisión que el tubo Pitot, del orden del ± 1%, tiene una baja pérdida de carga y se emplea para la medida de pequeños o grandes caudales de líquidos y gases.

La *placa-orificio variable* es una innovación de la placa-orificio. Permite obtener una gama de variaciones de caudal mucho más amplia que puede llegar hasta la relación 50 a 1, mientras que en la placa-orificio viene limitada por la relación 3 a 1.

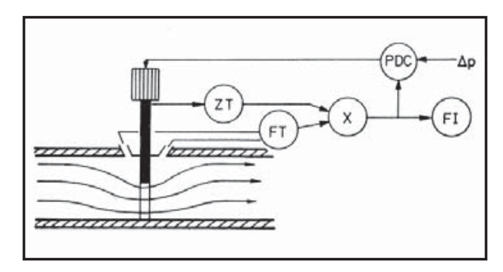


Figura 4.18 Placa-orificio variable

En la figura 4.18 puede verse un esquema de funcionamiento observándose que el sistema consiste en un servomotor con realimentación que posiciona una placa para obtener una presión diferencial especificada.

4.1.1.6 Medidor de codo

Se basa en la fuerza centrífuga ejercida por el fluido a su paso por un codo de la tubería. Esta fuerza es proporcional al producto $Densidad\ del\ líquido \times velocidad^2$ e inversamente proporcional al radio del codo. Situando dos tomas en el codo a 45°, la diferencia de presiones permitirá deducir el caudal del fluido. La pérdida de carga es sólo la del propio codo.

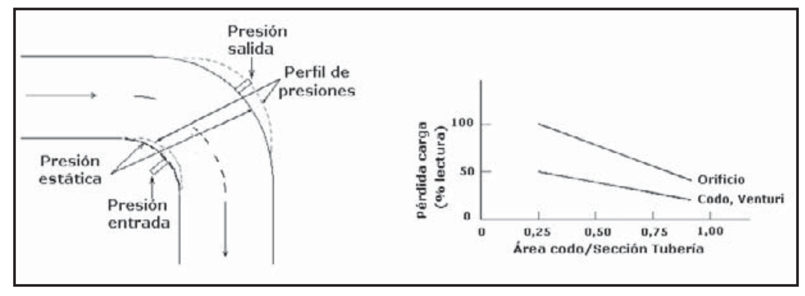
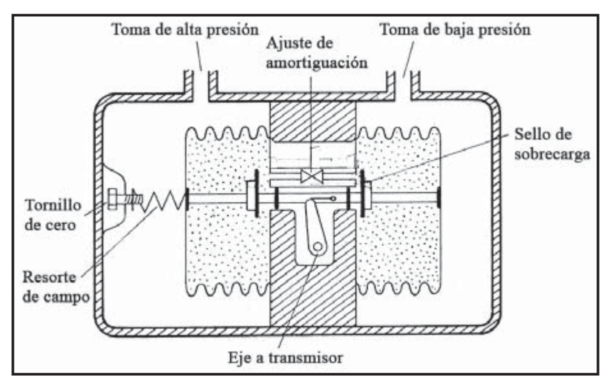


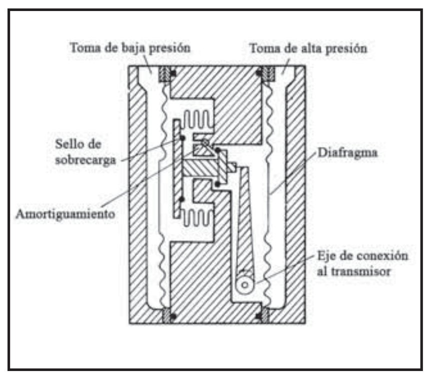
Figura 4.19 Medidor de codo

El coste del elemento es bajo. Sin embargo, como la diferencia de presiones es pequeña, su exactitud es baja y sólo se aplica cuando la precisión es suficiente y el coste de otros sistemas de medición sería muy elevado. Se han utilizado en la industria nuclear para captar las altas velocidades del fluido que se producen cuando hay una rotura en la tubería.

4.1.1.7 Transmisores de fuelle y de diafragma

La presión diferencial creada por la placa, la tobera o el tubo Venturi, puede medirse con un tubo en U de mercurio, o bien transmitirse con los instrumentos llamados convertidores diferenciales.





a) Transmisor de fuelle b) Transmisor de diafragma

Figura 4.20 Transmisores de fuelle y de diafragma

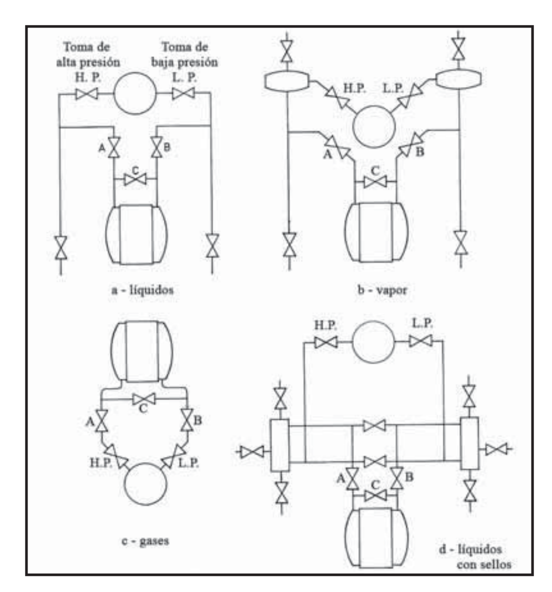
El *transmisor de presión diferencial de fuelle* (figura 4.20a) contiene dos cámaras para la alta y baja presión. La alta presión comprime el fuelle correspondiente arrastrando la palanca de unión, el cable

y un eje exterior cuyo movimiento actúa sobre el transductor neumático o electrónico. Un resorte de margen permite disponer de varias gamas de presión diferencial. La protección contra sobrecargas está asegurada por dos anillos de sello que cierran herméticamente el paso del líquido de llenado de un fuelle al otro, e impiden su destrucción ante una maniobra incorrecta. Otro accesorio es una válvula contra pulsaciones de caudal que restringe el paso del líquido de llenado entre los fuelles.

El *transmisor de presión diferencial de diafragma* (figura 4.20b) se diferencia del de fuelle en que la separación entre las dos cámaras se efectúa mediante diafragmas en lugar de fuelles, con lo cual el desplazamiento volumétrico es casi nulo.

El cuerpo de estos transmisores suele ser de acero al carbono, acero inoxidable o aluminio; el fuelle o diafragma de acero inoxidable 316 (disponible también en monel, hastelloy C, teflón en inoxidable o Kel-F en monel) y el líquido de llenado silicona.

Las conexiones entre las tomas del diafragma y el convertidor de presión diferencial deben ser adecuadas al fluido a medir (figura 4.21). Con el objeto de aislar el instrumento se prevén 3 válvulas que constituyen lo que se denomina un *manifold*; este tiene una doble misión, aislar el instrumento del proceso para su mantenimiento e igualar las presiones en las dos cámaras del instrumento en la puesta en marcha de la instalación.



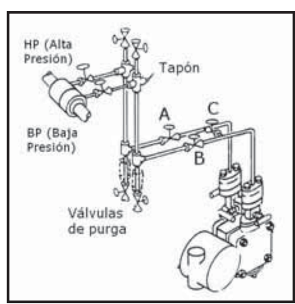


Figura 4.21 Conexiones entre el elemento y el transmisor de caudal

Si la tubería está sometida a una vibración fuerte, es aconsejable unir el instrumento al sistema mediante conexiones flexibles adecuadas a las condiciones de trabajo.

Si el fluido es corrosivo o viscoso, o bien condensa o evapora, o bien se congela o se solidifica, es necesario utilizar sistemas de sello que aíslen el instrumento del proceso. Un caso típico es la medida de caudal de vapor en la que el fluido de sello es el propio condensado del vapor. En otros casos, se suele emplear una mezcla de 50% de glicerina y 50% de agua.

Hay que señalar que en la medida de caudales de vapor con transmisores de fuelle es preciso, al variar el caudal, utilizar cámaras de condensación para compensar los cambios de volumen de las cámaras de fuelle. En los transmisores de diafragma, al ser el desplazamiento volumétrico despreciable, esto no es necesario.

Cuando los problemas de condensación o de evaporación del fluido o de obturación del elemento no pueden resolverse de otra forma, es necesario utilizar un sistema de purga que introduzca un fluido de purga en la zona de medida del elemento diferencial. El fluido de purga debe ser limpio, no debe reaccionar con el fluido medido, debe circular a un caudal bajo y constante (0,6 cm^3/s para líquidos y 60 cm^3/s para gas) y debe disponerse un sistema que impida la entrada del fluido del proceso en caso de un fallo en la purga.

Si el fluido de proceso es susceptible de condensación, solidificación o congelación a las temperaturas más bajas que puedan encontrarse en las tuberías, es necesario disponer de un sistema de calentamiento, en general con vapor a baja presión que impida este fenómeno. La calefacción eléctrica, si bien no está muy extendida, es cómoda y admite un buen control de temperatura.

Los transmisores citados de fuelle y diafragma, según la señal de transmisión usada utilizan, bien un transmisor neumático de equilibrio de fuerzas, bien un transductor electrónico de equilibrio de fuerzas o bien un transductor digital piezoresistivo o capacitivo, idénticos a los que se estudiaron en el capítulo de instrumentos de presión. En la figura 4.22 pueden verse estos transductores de caudal.

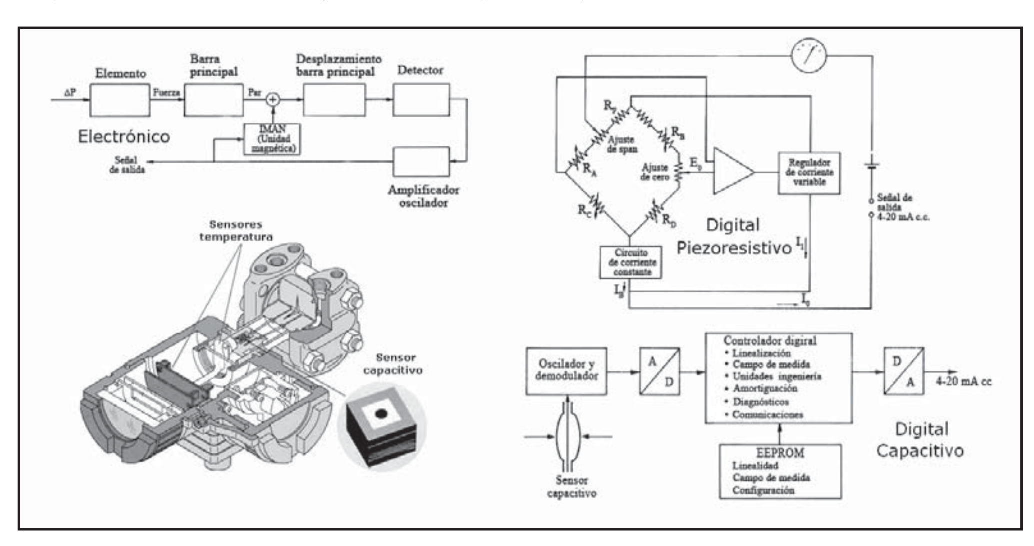


Figura 4.22 Transmisor de caudal electrónico y digital (piezoresistivo y capacitivo)

Los instrumentos transmisores o registradores de caudal miden, realmente, una presión diferencial y cómo el caudal varía según la raíz cuadrada de la presión diferencial, la escala o el gráfico del receptor,

a no ser que se utilice un extractor de raíz cuadrada intermedio, y estará graduado normalmente de 0-10 con un factor de conversión para poder leer directamente en unidades de caudal.

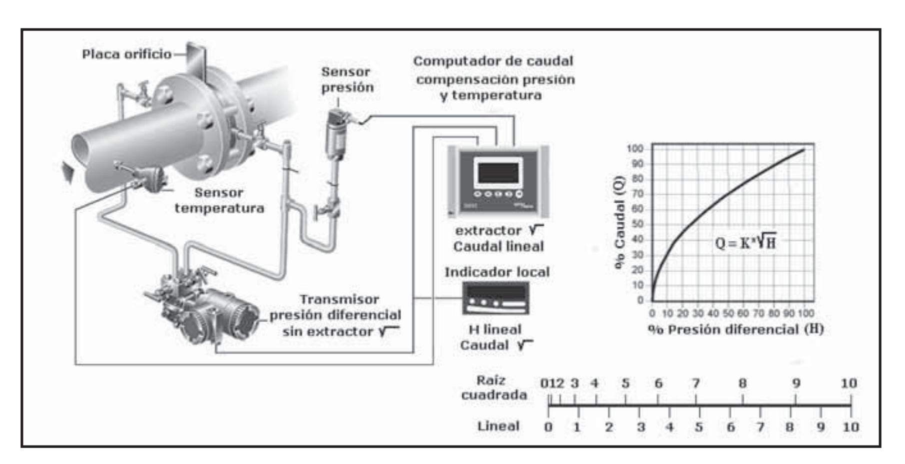


Figura 4.23 *Señales de presión diferencial y caudal en elementos deprimógenos (placa-orifico, tobera, tubo Venturi)*

Para conservar la exactitud de la medida se considera que la rangeabilidad es de 3:1. Los transmisores inteligentes de presión diferencial disponen de un algoritmo incorporado que extrae la raíz cuadrada de la señal, con lo que al receptor le llega una señal lineal.

4.1.1.8 Integradores

En ocasiones, desde el punto de vista de contabilización de caudales para propósitos de facturación o de balance energético de la planta, interesa *integrar* el caudal. Esto se consigue con integradores mecánicos, neumáticos, electrónicos o digitales.

Los integradores neumáticos reciben la señal de transmisión (0,2-1 bar o 3-15 psi), extraen la raíz cuadrada y la totalizan continuamente en un integrador de 5-6 dígitos. Los integradores electrónicos o digitales integran un valor analógico, o un número basado en una selección en segundos, minutos, horas o días o bien pulsos cada 20, 40, ... ms y el algoritmo de integración puede ser triangular, cuadrado, trapezoidal y pulsos.

En los estudios anteriores hemos visto que las variaciones de la densidad dependen, en un líquido, de los cambios en la temperatura y, en los gases y vapores, de las variaciones en la presión, en la temperatura y en la compresibilidad. El caudal real puede determinarse registrando dichas variables y calculando las correcciones, o bien, realizando las operaciones de corrección automáticamente.

La compensación automática se logra con un instrumento multiplicador-divisor de las tres variables, presión diferencial, presión y temperatura. Más adelante, en el apartado correspondiente a la determinación del caudal masa, estudiaremos este punto.

4.1.2 Área variable (rotámetros)

Los *elementos de área variable* se caracterizan por el cambio de área que se produce entre el elemento primario en movimiento y el cuerpo del medidor. Pueden asimilarse a una placa-orificio cuyo diámetro interior fuera variable dependiendo del caudal y de la fuerza de arrastre producida por el fluido.

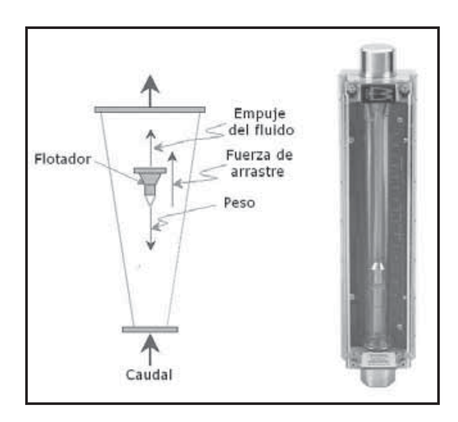


Figura 4.24 Rotámetro

El primer rotámetro, es decir, el primer elemento de área variable con flotador giratorio, fue inventado en 1908 por Kart Kueppers en Aachen (patente alemana 215225).

En el rotámetro, un flotador cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido. El flotador está en equilibrio entre su peso, la fuerza de arrastre del fluido y la fuerza de empuje del fluido sobre el flotador. El caudal depende del peso específico del líquido, de su viscosidad y de los valores de la sección interior del tubo, ya que la misma cambia según sea el punto de equilibrio del flotador.

La condición de equilibrio del flotador, según las fuerzas que actúan sobre el mismo (figura 4.24) es:

$$G = v_1 \rho_f$$

$$F = v_1 \rho_l$$

$$E = C_d \rho_l A_f \times \frac{v^2}{2g}$$

$$F + E = G$$

en las que:

G = peso del flotador

v_f = volumen del flotador

ρ_f = densidad del flotador

ρ_l = densidad del fluido

E = fuerza de arrastre del fluido sobre el flotador

F = fuerza de empuje del fluido sobre el flotador

C_d = coeficiente de arrastre del fluido sobre el flotador

v = velocidad del fluido

A_f = área de la sección del flotador

A_w = sección interior del tubo

Resolviendo las ecuaciones anteriores, resulta:

$$v = \sqrt{\frac{2gv_f(\rho_f - \rho_l)}{C_d \rho_l A_f}}$$

El valor de C_d depende de la viscosidad del fluido.

El rotámetro, al ser un diafragma de orificio variable, tendrá como éste, un coeficiente de descarga que englobará el reparto desigual de velocidades, la contracción de la vena del fluido, las rugosidades de la tubería, etc.

Por conveniencia, se incorpora el término $C = \sqrt{\frac{1}{C_d}}$ a este coeficiente de descarga, pasando la expresión anterior a:

$$v = C\sqrt{\frac{2gv_f(\rho_f - \rho_l)}{\rho_l A_f}}$$

Como el caudal es:

$$Q_v = v \times A_w$$

con A_w sección interior del tubo, resulta:

$$Q_v = CA_w\sqrt{\frac{2gv_f(\rho_f - \rho_l)}{\rho_l A_f}}$$

o bien en unidades de masa:

$$Q_m = CA_w\sqrt{\frac{2gv_f(\rho_t - \rho_l)}{A_f}\rho_l}$$

Esta fórmula permite determinar el caudal del fluido que pasa a través de un rotámetro conocido. Este caudal depende del peso específico del líquido y de la sección interior del tubo A_w, ya que la misma cambia según sea el punto de equilibrio del flotador. Por este motivo, la elección del tamaño de los rotámetros es laboriosa y es conveniente emplear algún método que simplifique los cálculos anteriores.

Con el fin de normalizar los cálculos se acostumbra a referir los caudales del líquido o del vapor y gas a sus equivalentes en agua y aire respectivamente. Se utilizan las siguientes ecuaciones:

Caudal de líquido:

$$Q_l = CA_w\sqrt{\frac{2gv_f(\rho_f - \rho_l)}{\rho_l A_f}}$$

Caudal equivalente en agua:

$$Q_{agua} = CA_w\sqrt{\frac{2gv_f(8,04 - 1)}{1 \times A_f}}$$

Habiendo considerado un flotador de acero inoxidable 316 de densidad 8,04; dividiendo ambas ecuaciones y despejando el caudal equivalente en agua, resulta:

$$Q_{agua} = Q_l \sqrt{\frac{\rho_l \times 7,04}{\rho_f - \rho_l}}$$

Análogamente, para un gas a t en °C y p en mm Hg, y despreciando ρ_g en el término ρ_f - ρ_g resulta:

$$Q_{aire}(Nm^3 / minuto) = Q_g(Nm^3 / minuto)\sqrt{\rho_g \times \frac{T}{288} \times \frac{760}{P} \times \frac{8,04}{\rho_f}}$$

en la que:

ρ_g = densidad del gas referida al aire a 15 °C y 760 mm Hg

T = temperatura absoluta del gas (273 + t)

P = presión absoluta del gas en mm Hg (p + 760)

y en el caso de vapor:

$$Q_{aire}(Nm^3 / minuto) = Q_{aire}(Kg / minuto) \times 2,56 \times \sqrt{\frac{v_g}{\rho_f}}$$

en la que v_g es el volumen específico del vapor de agua en las condiciones de servicio y el caudal de vapor está expresado en masa.

Las fórmulas anteriores, reglas de cálculo o programas informáticos permiten determinar los caudales equivalentes en agua o en aire del fluido y, de aquí, el tamaño del rotámetro consultando las tablas del fabricante. Estas dan el tamaño, el número del tubo y el del flotador con su forma y peso.

Los tubos empleados en los rotámetros pueden ser de vidrio y metálicos. Los fabricantes los mecanizan de tal modo que queda asegurada la intercambiabilidad de los diversos tubos y flotadores, a fin de obtener los caudales respectivos sin necesidad de calibrar individualmente cada rotámetro.

Los tubos de vidrio pueden ser con nervios interiores, que sirven para guiar el flotador, o bien lisos. Los tubos metálicos son siempre cónico lisos y precisan de extensión por no tener una lectura directa.

Los tubos tienen una conicidad que viene expresada como la relación entre el diámetro interno del tubo en la escala máxima y el diámetro de la cabeza del flotador. Esta relación varía de 1,20 a 1,35.

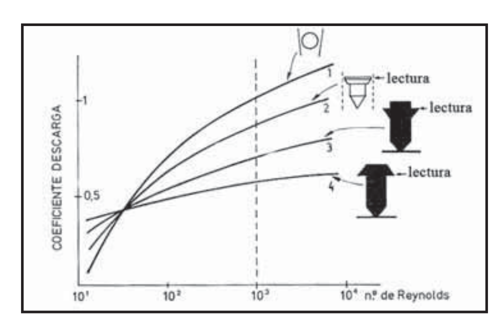


Figura 4.25 Curvas de viscosidad

Los flotadores pueden tener varios perfiles de construcción. En la figura 4.25 pueden verse los más utilizados:

- Esféricos (posición 1) para bajos caudales y poca precisión, con una influencia considerable de la viscosidad del fluido.
- Cilíndrico con borde plano (posición 2) para caudales medios y elevados, con una influencia media de la viscosidad del fluido.
- Cilíndrico, con borde saliente de cara inclinada contra el flujo (posición 3), con menor influencia de la viscosidad. Por sus características de caudal puede compararse a una tobera.
- Cilíndrico, con bordes salientes contra el flujo (posición 4) y con la mínima influencia de la viscosidad del fluido. Por su funcionamiento puede compararse a una placa-orificio o tobera.

La figura 4.25 indica la influencia que la viscosidad del fluido puede tener en el coeficiente de descarga del rotámetro, señalando las características relativas de independencia de cada tipo de flotador.

El material más empleado en los flotadores es el acero inoxidable 316 si bien, para satisfacer la gran variedad de requerimientos de resistencia a la corrosión que se presenta en la industria, también se utilizan otros metales. También se utilizan flotadores de plástico, si bien se prefieren los metálicos por su mayor facilidad de mecanización del borde superior.

En las tablas 4.6 y 4.7 se indican las densidades de los materiales comunes empleados en los flotadores normales y esféricos, respectivamente.

Materiales comunes flotadores normales			
Material	**Densidad**	**Material**	**Densidad**
Aluminio	2,72	Inox. 316	8,04
Bronce	8,78	Hastelloy B	9,24
Durimet	8,02	Hastelloy C	8,94
Monel	8,84	Plomo	11,38
Níquel	8,91	Tantalio	16,6
Goma	1,2	Teflón	2,2
Inox. 303	7,92	Titanio	4,5

Tabla 4.6 Materiales comunes de flotadores normales

Materiales comunes de flotadores esféricos			
Material	**Densidad**	**Material**	**Densidad**
Vidrio de borosilicato	2,2	Inox. 316	8,04
Aluminio	2,72	Monel	8,84
Zafiro	4,03	Carboloy	14,95
Inox 304	7,92	Tantalio	16,6

Tabla 4.7 Materiales comunes de flotadores esféricos

Las escalas de los rotámetros están grabadas en una escala de latón o de aluminio montada a lo largo del tubo y situada en coincidencia con la línea de cero del tubo, o bien directamente en el tubo de vidrio. La escala puede estar graduada en unidades directas del caudal (referido siempre a unas condiciones de servicio dadas) o bien en porcentaje del 10% al 100% de la escala total.

En este último caso, se añade un factor de multiplicación a todas las lecturas para convertir a unidades de caudal en volumen o peso del fluido. Otra forma de graduar la escala es en mm , acompañando una curva de calibración caudal-lectura en mm para determinar el caudal del fluido. La curva de calibración se emplea en rotámetros de pequeña capacidad, en los cuales el caudal no es lineal dentro del intervalo del campo de medida 10 a 1. Hay que señalar que la rangeabilidad (valor máximo a valor mínimo del caudal medible conservando la exactitud del aparato) de los rotámetros es de 10 a 1.

La pérdida de carga del rotámetro es constante en todo el recorrido del flotador y puede hacerse muy baja mediante una forma adecuada de éste. La pérdida de carga del flotador puede determinarse a partir de la expresión siguiente que relaciona el peso efectivo del flotador con su sección transversal máxima.

$$\Delta p = \frac{G_f - v_f \times \rho_l \times g}{A_f}$$

en la que:

G_f = peso del flotador

v_f = volumen del flotador

ρ_l = densidad del fluido

A_f = sección transversal máxima del flotador

A esta pérdida de carga hay que sumar la debida a las conexiones y al tubo para obtener la pérdida de carga total. El valor aproximado de ésta es el doble de la del flotador.

Del examen de la expresión del caudal de un rotámetro se desprende que su capacidad depende de las densidades del flotador y del fluido. Si cambian las condiciones de empleo de un rotámetro ya calibrado, es necesario aplicar unos factores para corregir el caudal leído. Estos factores se deducen de forma parecida al cálculo realizado en la determinación del tamaño del rotámetro de los caudales equivalentes en agua y en aire del fluido, y son los siguientes:

Variación en las densidades del flotador y del fluido

Factor en un líquido:

$$K_v = \frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{(\rho_{f2} - \rho_{l2}) \times \rho_{l1}}{(\rho_{f1} - \rho_{l1}) \times \rho_{l2}}}$$

En el caso de un gas, su densidad puede despreciarse frente al peso específico del flotador, de modo que el factor correspondiente es:

Factor en un gas:

$$K_v = \sqrt{\frac{\rho_{f2} \times \rho_{g1}}{\rho_{f1} \times \rho_{g2}}}$$

en la que Q_1 son las condiciones de calibración y Q_2 las nuevas condiciones de servicio; se supone el mismo coeficiente de descarga en ambos casos.

Variación en la temperatura

En los líquidos, los cambios en la temperatura hacen variar la densidad del líquido, luego:

Factor en un líquido:

$$K_t = \sqrt{\frac{(\rho_f - \rho_{l2}) \times \rho_{l1}}{(\rho_f - \rho_{l1}) \times \rho_{l2}}}$$

En un gas la densidad varía inversamente a la temperatura absoluta, luego:

Factor en un gas expresado en unidades de volumen:

$$K_t = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$

Variación en la presión

En un líquido no influye por ser el líquido incompresible, en cambio en los gases la densidad varía directamente con la presión absoluta, luego:

Factor en un gas:

$$K_p = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}}$$

Las variaciones simultáneas en la densidad, la temperatura y la presión se tienen en cuenta con el factor:

$$K_{DTP} = \sqrt{\frac{\rho_{l1} \times T_1 P_2}{\rho_{l2} \times T_2 P_1}} \text{ en unidades volumétricas}$$

$$K_{DTP} = \sqrt{\frac{\rho_{l2} \times T_2 P_1}{\rho_{l1} \times T_1 P_2}} \text{ en unidades de masa}$$

Al deducir la ecuación del caudal del rotámetro no se tuvo en cuenta la fuerza debida a la viscosidad. Tal como se vio anteriormente, su magnitud depende de la forma del flotador y de la viscosidad del fluido, en particular, del número de Reynolds en el espacio anular comprendido entre la superficie del flotador y la interior del tubo.

Cuanto más alto es el número de Reynolds, tanto menor será la influencia debida a las variaciones de la viscosidad; de este modo, se desprecia la influencia que puedan tener dichas variaciones en los gases, ya que éstos dan un alto número de Reynolds. En los líquidos, un adecuado diseño del flotador permite obtener inmunidad frente a dichas variaciones.

En la figura 4.25 se representan las curvas de viscosidad para un mismo tubo con diferentes formas de los flotadores del mismo peso y densidad. Puede observarse que la curva del flotador 4 es casi plana, de tal modo que se utiliza siempre que sean apreciables los efectos de la viscosidad.

Cuando la viscosidad del fluido es muy elevada, no es posible encontrar el caudal equivalente en agua, siendo necesario calibrar el rotámetro por simulación hidráulica, o bien, con el mismo líquido del proceso. Los límites de aplicación de los flotadores tipos 3 y 4 pueden verse en la figura 4.26.

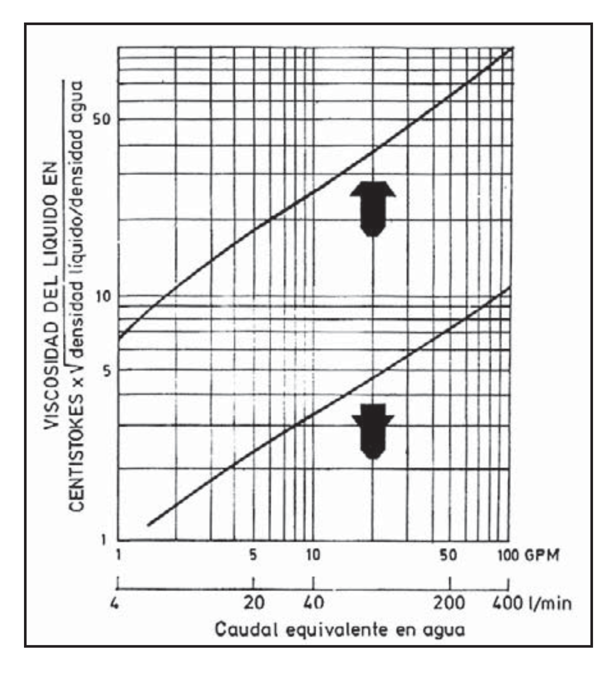


Figura 4.26 Límites de aplicación de los flotadores según la viscosidad

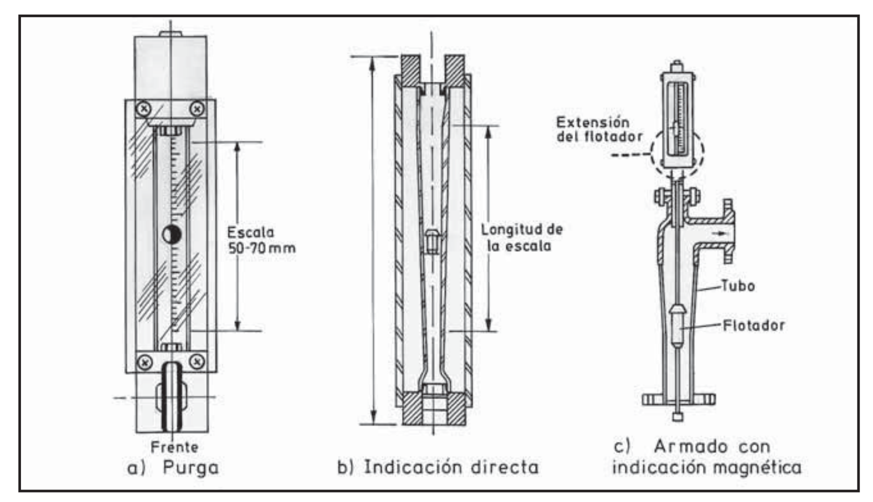
La simulación hidráulica para obtener las curvas de corrección se basa en utilizar un aceite de características conocidas (viscosidad, temperatura y densidad) y suponer una densidad (correspondiente a una temperatura dada) para el fluido cuyas curvas de viscosidad desean determinarse. Se verifica la ecuación:

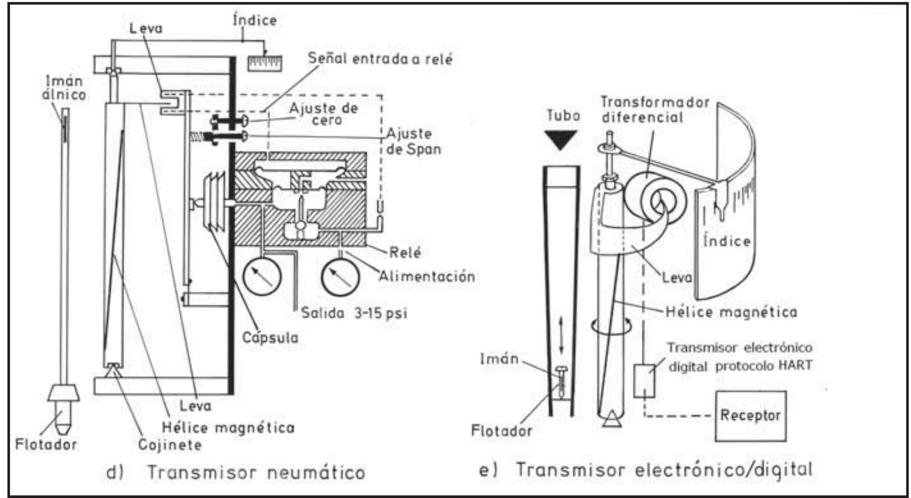
$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \sqrt{\frac{\rho_{f2} - \rho_{l1}}{\rho_{f2} - \rho_{l2}} \times \frac{\rho_{l2}}{\rho_{l1}}}$$

en la que las condiciones 1 se refieren al aceite conocido y las 2 al simulado. Esta expresión permite calcular la viscosidad del fluido simulado 2. El mayor problema que se presenta en las calibraciones de viscosidad es en la obtención de curvas correctas de temperatura-viscosidad, de modo que los datos conocidos de la viscosidad se corresponden exactamente con las temperaturas de trabajo en la planta.

La calibración de los rotámetros se consigue, básicamente, manteniendo constante el paso de un caudal a través del rotámetro y midiendo la cantidad de líquido o de gas recogido en un tiempo dado y medido con precisión.

En los líquidos, los aparatos de medida del volumen suelen ser buretas graduadas o básculas, mientras que en los gases se suelen utilizar gasómetros y calibradores, graduados con sello de mercurio. Para medir el tiempo se emplean cronómetros capaces de medir 0,01 segundos como mínimo.





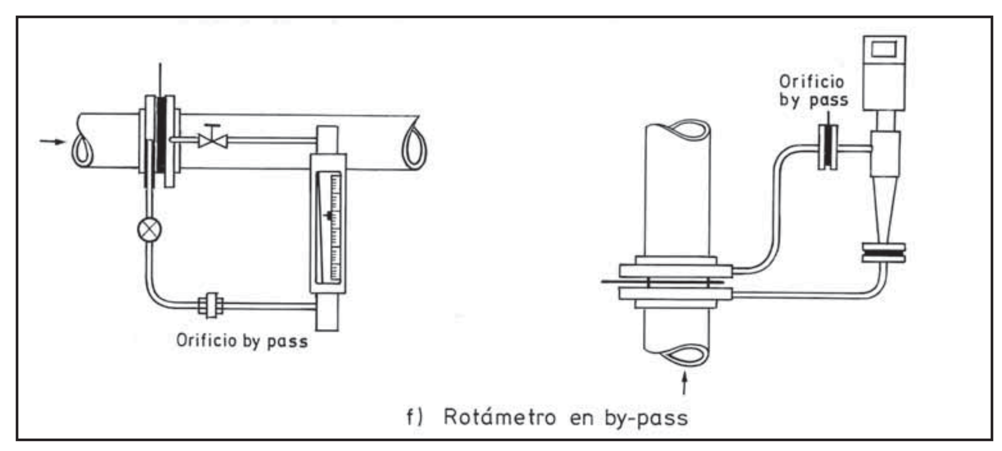


Figura 4.27 Tipos de rotámetros

Según la aplicación, los rotámetros pueden dividirse en rotámetros de purga, de indicación directa para usos generales y armados con indicación magnética y transmisión neumática, electrónica y digital (figura 4.27).

Los rotámetros de purga se utilizan para caudales muy pequeños. Algunas de sus aplicaciones típicas son la purga hidráulica de los sellos mecánicos de las bombas generales de la planta, la medición del nivel por burbujeo, la purga de elementos de presión diferencial para la medida de caudal evitando la obturación de las tuberías y la purga de instrumentos que trabajan en atmósferas corrosivas o polvorientas.

Los rotámetros de vidrio de indicación directa pueden adoptar varias disposiciones: llevar placas laterales, estar cerrados con cuatro placas con ventana de cristal para ver el tubo; disponer de armadura de seguridad o blindada de cierre estanco para evitar que, en caso de rotura del tubo, el gas o el líquido interiores puedan dañar al operador; disponer de armadura antihielo con gel de sílice para evitar la presencia de humedad en el espacio entre la armadura y el tubo que podría impedir la visibilidad del flotador.

Los rotámetros armados incorporan un tubo metálico que no permite la lectura directa del caudal, con lo cual precisan de indicación externa o de transmisión.

Los rotámetros se emplean asimismo conectados a las tomas de una placa-orificio o diafragma, es decir, como rotámetros *by-pass*. En esta aplicación, en lugar de medir la presión diferencial, miden el caudal del fluido que circula de la toma de alta presión a la baja, debido a la presión diferencial creada por la placa. El rotámetro determina un caudal proporcional linealmente al caudal principal de paso por la tubería gracias a un segundo orificio situado en la tubería de *by-pass* y calibrado de tal forma que el flotador marca el 100% de la escala cuando el caudal, que pasa a través de la placa-orificio en la tubería principal, llega al 100% con la presión diferencial máxima de cálculo.

Como el rotámetro en *by-pass* mide caudal y no presión diferencial (utilizándose sólo la presión diferencial creada por la placa-orificio en la tubería principal como una bomba hidráulica que crea un caudal derivado del principal) la escala de medida es lineal y no de raíz cuadrada como sería al suponer que el elemento de medida fuese un diafragma.

Los transmisores neumáticos acoplados al rotámetro consisten en una leva que sigue magnéticamente el movimiento del flotador y que se encuentra situada entre dos toberas neumáticas. Estas toberas forman parte de un transmisor de equilibrio de movimientos.

Los transductores electrónicos acoplados a rotámetros pueden ser potenciométricos o de puente de impedancias. Ambos disponen de una varilla que sigue magnéticamente el movimiento del flotador dentro del tubo y que acciona un potenciómetro en el primero y un transformador diferencial de núcleo móvil el segundo.

El transmisor análogico/digital (figura 4.28) es híbrido utilizando el protocolo HART, lo que le permite enviar la señal analógica de 4-20 mA c.c. y la señal digital con el protocolo HART por el mismo par de hilos del transmisor electrónico analógico. El transmisor puede programarse mediante un comunicador portátil para indicación, transmisión e integración del caudal, factores de calibración y alarmas de alto y bajo caudal. Estos instrumentos tienen una exactitud del ± 1% o menor en toda la escala y una repetibilidad del ± 0,25%.

Excepto en el caso de rotámetros de purga, debe dejarse una longitud mínima de tubería recta de 5 diámetros aguas arriba del rotámetro. El máximo error que puede producir una perturbación es del 5%.

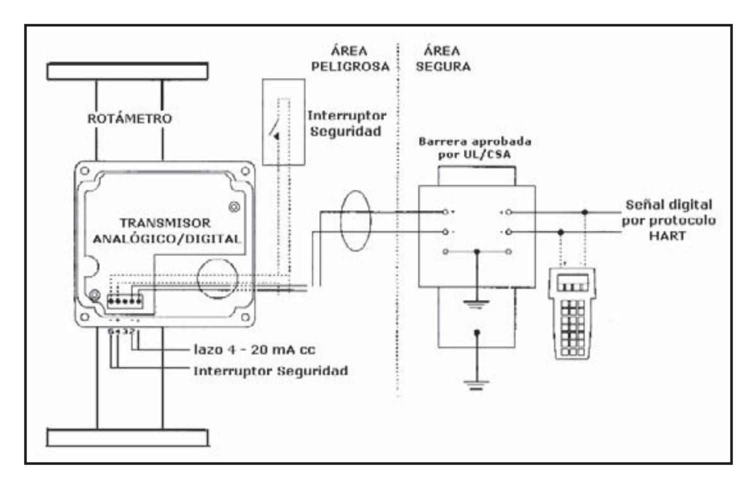


Figura 4.28 Rotámetro con transmisor analógico/digital

El intervalo de medida de los rotámetros es usualmente de 1 a 10 (relación entre el caudal mínimo y el máximo) con una escala lineal. Su exactitud es del orden de ± 2% de toda la escala cuando están sin calibrar y de ± 1% con calibración.

Los rotámetros son adecuados para la medida de pequeños caudales llegando a límites mínimos de 0,1 cm^3/minuto en agua y de 1 cm^3/minuto en aire. El valor máximo que pueden alcanzar es de 3,5 m^3/minuto en agua y de 30 m^3/minuto en aire. Pueden utilizarse en la medida de mayores caudales montándose como rotámetros *by-pass* en la tubería.

4.1.3 Velocidad

4.1.3.1 Vertederos y Venturi

En la medición del caudal en canales abiertos se utilizan vertederos de formas variadas que provocan una diferencia de alturas del líquido en el canal, entre la zona anterior del vertedero y su punto más bajo. El vertedero debe formar un ángulo recto con la dirección del caudal y el canal aguas arriba debe ser recto como mínimo en una distancia de 10 veces la anchura.

La diferencia de alturas debe medirse en un punto aguas arriba lo suficientemente alejado como para no ser influido por la curva de bajada de la superficie del agua y es conveniente, incluso, utilizar un pozo de protección (tubería de Ø ligeramente mayor que el flotador) para el flotador del instrumento de medida, caso de utilizar este sistema.

El caudal es proporcional a la diferencia de alturas según la fórmula general empírica:

$$Q = K \times l \times H^n$$

Q = caudal, en m^3/s

K = constante que depende del tipo de vertedero

l = anchura de la garganta del vertedero, en m

H = diferencia máxima de alturas, en m

n = exponente que depende del tipo de vertedero o canal

Los vertederos más empleados son de los siguientes tipos (figura 4.29):

- *Rectangular* (figura 4.29a) con contracción lateral, simple y fácil de construir y el más económico. Es apto para la medida de caudales de 0-60 m^3/h a 0-2.000 m^3/h. La fórmula de medida de caudales que suele usarse es la de Francis:

  $$Q = 1{,}84(l - 0{,}2H)H^{\frac{3}{2}} \ \ m^3/s$$

  siendo l la anchura del rectángulo en m.

  El valor de $0{,}2H$ viene, sustituido por $0{,}1H$ si no hay contracción del manto vertido, es decir, si l = anchura del canal.

- *Triangular o en V* (figura 4.29b) que consiste en una placa con un corte en V de vértice dirigido hacia abajo y con cada lado igualmente inclinado respecto a la vertical. A igualdad de tamaño, su campo de medida es más amplio que el de los otros vertederos. Es capaz de medir caudales dentro del intervalo 0-30 m^3/h a 0-2.300 m^3/h. La fórmula empírica aplicable es:

  $$Q = 1{,}33 \times H^{2{,}475} \ \ m^3/s$$

  para un vertedero en V de 90.

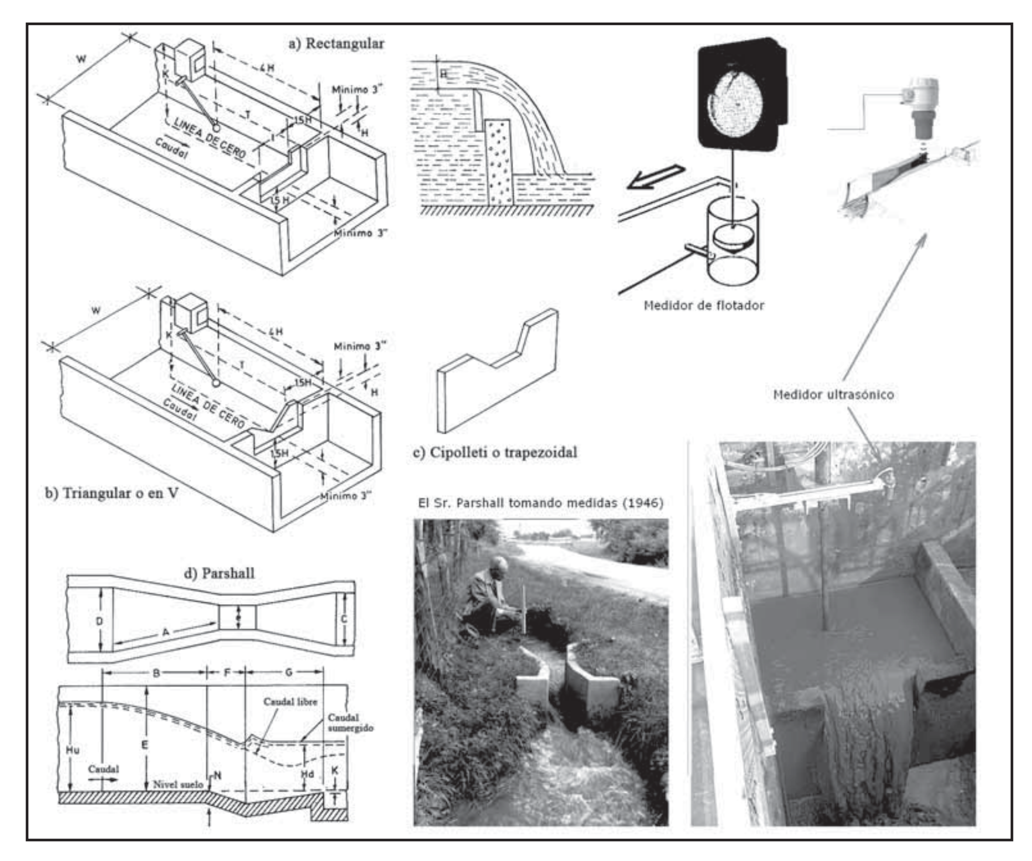


Figura 4.29 Tipos de vertederos

- *Cipolleti o trapezoidal* (figura 4.29c) con la ranura en forma de trapecio invertido. La pendiente de los lados del trapecio corrige las contracciones laterales del manto de agua y el caudal es, por lo tanto, proporcional a la altura de la cresta. Su campo de medida equivale al del vertedero rectangular. La fórmula empírica es:

$$Q = 1{,}86 l H^{\frac{3}{2}} \ m^3/s$$

- El *vertedero Parshall o Venturi* (figura 4.29d) se emplea normalmente en aquellas aplicaciones en las que un vertedero normal no es siempre adecuado, tal como ocurre cuando el líquido transporta sólidos o sedimentos en cantidad excesiva, o bien cuando no existe altura de presión suficiente, o bien cuando no es posible construir un tramo recto de longitud suficiente (un mínimo de 10 veces la anchura del canal). Puede utilizarse para caudales superiores a 0-30 m^3/h. El vertedero Parshall es de forma parecida al tubo Venturi. Consiste en paredes verticales y con el suelo inclinado en la estrangulación tal como puede verse en la figura 4.29d. La descarga del fluido puede presentarse de dos formas:
  - Caudal libre, cuando la elevación del agua después de la estrangulación es lo suficientemente baja como para impedir que el agua que se descarga retorne hacia atrás y no siga suavemente el perfil del elemento Parshall.
  - Caudal sumergido cuando el agua está a demasiada altura después de la estrangulación y vuelve hacia atrás. Se procura evitar por la complicación de los cálculos de la descarga.

La condición de caudal libre se tiene cuando la relación de las alturas de cresta en la parte plana y en la parte final del elemento, referidas al nivel plano, H_u/H_d es menor de 0,6 para un elemento de garganta hasta 230 mm y menor de 0,7 para anchuras de garganta mayores de 300 mm. Relaciones mayores dan lugar a caudales del tipo sumergido en el cual el caudal es una función de H_u y H_d, mientras que en la condición de caudal libre el flujo es únicamente función de H_u. Se suele mantener generalmente esta condición.

La ecuación general empírica del vertedero Parshall es $Q = K \times l \times H^n$ con los coeficientes de la tabla 4.8.

Constantes del vertedero Parshall			
K	**l (m)**	**l (pies)**	**n**
2,32	0,076	1/4	1,547
2,5	0,152	1/2	1,58
2,34	0,228	3/4	1,53
2,26	0,305	1	1,522
2,31	0,457	1,5	1,54
2,34	0,609	2	1,55
2,39	0,914	3	1,566
2,42	1,219	4	1,578

Tabla 4.8 Constantes de vertedero Parshall

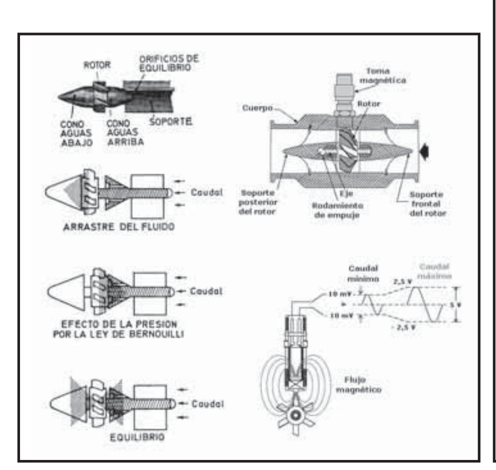
La medida del caudal puede efectuarse multiplicando la velocidad, medida con un tubo Pitot, por la sección del canal.

Como la relación entre la altura del líquido y el caudal es lineal, se utiliza un instrumento de flotador (figura 4.29a), o bien de burbujeo, que mide la diferencia de alturas dada y puede indicar, regular y registrar directamente el caudal o bien transmitirlo a distancia con un transmisor del tipo electrónico o digital.

Otro sistema es la medición directa mediante un sensor ultrasónico con indicación y transmisión.

4.1.3.2 Turbinas

Los *medidores de turbina* (figura 4.30) consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal. El fluido choca contra el borde frontal de las palas del rotor produciendo un área de baja presión y, como resultado de esta presión diferencial, las palas giran.



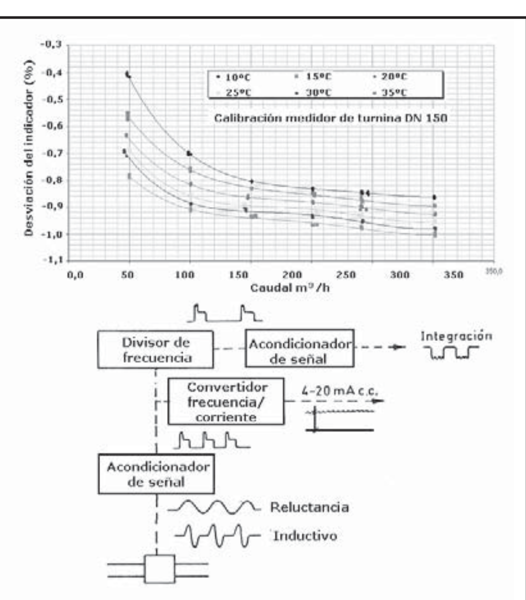


Figura 4.30 Medidor de turbina

Como la velocidad del fluido baja inmediatamente después de las palas de la turbina, por el principio de Bernouilli aumenta la presión aguas abajo de la turbina y, como consecuencia, se ejerce una fuerza igual y opuesta a la del fluido aguas arriba y, de este modo, el rotor está equilibrado hidrodinámicamente y gira entre los conos anterior y posterior sin necesidad de utilizar rodamientos axiales, evitando así los efectos indeseables de un rozamiento que necesariamente se produciría.

Existen dos tipos de convertidores para captar la velocidad de la turbina. En el de reluctancia, la velocidad viene determinada por el paso de las palas individuales de la turbina a través del campo magnético creado por un imán permanente montado en una bobina captadora exterior. El paso de cada pala varía la reluctancia del circuito magnético. Esta variación cambia el flujo, induciendo en la bobina captadora una corriente alterna que, por lo tanto, es proporcional al giro de la turbina.

En el tipo inductivo, poco usado actualmente, el rotor lleva incorporadas piezas magnéticas y el campo magnético giratorio que se origina induce una corriente alterna en una bobina captadora exterior.

En ambos casos la frecuencia que genera el rotor de turbina es proporcional al caudal, siendo del orden de 250 a 1200 ciclos por segundo para el caudal máximo. Por ejemplo, si un rotor de seis palas gira a 100 revoluciones por segundo, genera 600 impulsos por segundo. El número de impulsos por unidad de caudal es constante (figura 4.31). La turbina está limitada por la viscosidad del fluido, debido al cambio que se produce en la velocidad del perfil del líquido a través de la tubería cuando aumenta la viscosidad. En las paredes, el fluido se mueve más lentamente que en el centro, de modo que las puntas de las palas no pueden girar a mayor velocidad. En general, para viscosidades superiores a 3-5 centistokes se reduce considerablemente el intervalo de medida del instrumento.

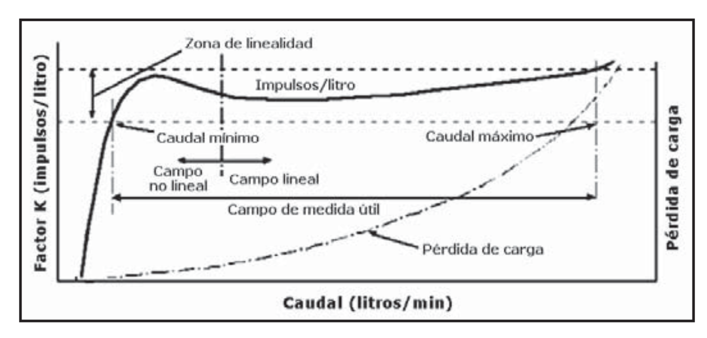


Figura 4.31 Curvas del medidor de turbina

La exactitud es muy elevada, del orden del ± 0,3%. La máxima precisión se consigue con un régimen laminar, instalando el instrumento en una tubería recta de longitudes mínimas 15 diámetros aguas arriba y 6 diámetros aguas abajo. El campo de medida llega hasta la relación 15 a 1 entre el caudal máximo y el mínimo, y la escala es lineal.

El medidor debe estar instalado de tal modo que siempre esté lleno de líquido aunque el caudal sea nulo, ya que, en la puesta en marcha, el choque del fluido a alta velocidad podría dañarlo seriamente. Es necesario el empleo de un filtro a la entrada del instrumento, incluso para mediciones de caudal de agua, ya que la más pequeña partícula podría desgastar los álabes de la turbina y afectar a la exactitud de la medida. La frecuencia generada por el medidor de turbina se transmite a un convertidor indicador o totalizador.

En la medición de gas se instalará siempre aguas arriba un filtro de cartucho con un grado de filtración mínimo de 3-5 micras o, en cualquier caso, el recomendado por el fabricante.

Los medidores de turbina pueden trabajar con caudales un 20% superior al caudal máximo estipulado sin producir daños. No obstante, la velocidad excesiva del rotor disminuirá la duración de los cojinetes en el caso de que se alcancen caudales tan altos periódicamente.

4.1.3.3 Transductores ultrasónicos

Los *transductores de ultrasonidos* se basan en el fenómeno "ultrasónico" caracterizado porque las pequeñas perturbaciones de presión en el seno de un fluido se propagan a la velocidad del sonido correspondiente al fluido. Si, además, el fluido posee también velocidad, entonces la velocidad absoluta de la propagación de la perturbación de presión es la suma algebraica de ambas.

En la práctica, las pequeñas perturbaciones de presión son pequeñas crestas de ondas sinusoidales cuya frecuencia está por encima del rango audible para el ser humano, sobre los 20.000 Hz, siendo 10.000 Hz un valor habitual.

Se aplica a un cristal una energía eléctrica, en forma de una pequeña perturbación de voltaje a alta frecuencia, provocando un estado de vibración. Si el cristal está en contacto con el fluido, esta vibración se transmite a éste y se propaga a su través. El haz cónico proyectado desde un cristal circular tiene un semiángulo α dado por la siguiente expresión:

$$\alpha = 1{,}2\lambda/D$$

Para que el haz acústico esté bien definido, la relación λ/D debe ser pequeña. Siendo D del orden de 1 cm (instrumento compacto), el valor de λ podrá ser del orden de 1 mm. El agua, por ejemplo, tiene una longitud de onda $\lambda = 1{,}5 \times 10^6/f$, en mm, ($f$ es la frecuencia en Hz); así que la necesidad de frecuencias del orden de megahercios resulta obvia.

El cristal receptor se expone a estas fluctuaciones de presión y responde vibrando también. Dicho movimiento vibratorio produce una señal eléctrica proporcional a la acción habitual de desplazamiento del transductor piezoeléctrico.

En uno de los modelos más sencillos (figura 4.32a), se verifican las siguientes ecuaciones:

$$T_{aguas\ abajo}(A\ a\ B) = \frac{\dfrac{D}{sen\ \alpha}}{c + V \times \cos\alpha}$$

$$T_{aguas\ arriba}(B\ a\ A) = \frac{\dfrac{D}{sen\ \alpha}}{c - V \times \cos\alpha}$$

En las que:

- c = velocidad del sonido en el fluido
- D = diámetro de la tubería
- V = velocidad media del fluido
- α = ángulo de la trayectoria del sonido con el eje de la tubería

Resolviendo las ecuaciones anteriores resulta:

$$V = \frac{\dfrac{D}{sen\ 2\alpha} \times \left(T_{aguas\ arriba} - T_{aguas\ abajo}\right)}{T_{aguas\ arriba} \times T_{aguas\ abajo}} = \frac{D}{sen\ 2\alpha} \times \frac{\Delta T}{T_{aguas\ arriba} \times T_{aguas\ abajo}}$$

$$Q = K \times A \times V$$

con:

- Q = caudal del fluido
- K = coeficiente del instrumento determinado por calibración
- A = área de la sección de la tubería

Esta fórmula indica que las medidas de la velocidad y del caudal son independientes de las propiedades del fluido, de la presión, temperatura, materiales de la tubería, etc.

En otras técnicas de medición se mide la diferencia de fases o la diferencia de frecuencias entre las ondas del sonido que recorren el fluido en ambos sentidos.

El sensor puede ser fijado con abrazaderas al exterior de la tubería o bien puede estar montado dentro de la tubería en contacto con el fluido.

En otro método, utilizado en fluidos limpios, se desvía el haz de sonido emitido por un transmisor perpendicularmente a la tubería (figura 4.32b).

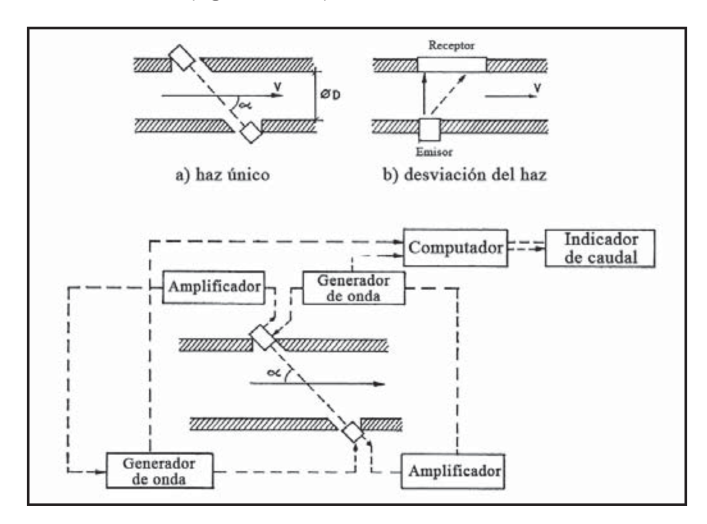


Figura 4.32 Medición de caudal por ultrasonidos

Los transductores ultrasónicos con un solo haz tienen una exactitud del ± 2% al ± 3% y un intervalo de medida de caudales de 20 a 1 con una escala lineal. Con dos haces, la exactitud alcanza ± 0,5%. Con tres haces el instrumento es capaz de diferenciar el flujo laminar del turbulento con lo que, añadiendo un software inteligente, la exactitud llega al ± 0,3%.

Un transductor de 5 haces (10 sensores) cumple con las condiciones rigurosas del trasvase y medida de caudal de productos petrolíferos de alto valor.

Estos elementos no tienen partes móviles, con lo cual tienen muy poco mantenimiento, no perturban el fluido, su perdida de carga es muy pequeña, la operación es bidireccional y su rangeabilidad (relación entre el caudal máximo y el mínimo sin perder exactitud en la medida) es grande.

Son adecuados en la medida de la mayor parte de líquidos. Son sensibles a los cambios en la densidad del líquido, y por lo tanto a la temperatura, ya que estas variables influyen en la velocidad del sonido. Por ejemplo, la velocidad del sonido en el seno del agua varía un0,2% por grado centígrado de cambio en la temperatura.

- *Método Doppler* (figura 4.33). Fue descrito inicialmente por el físico austriaco Christian Doppler en 1842. Se proyectan ondas sónicas a lo largo del flujo del fluido y se mide el corrimiento de frecuencia que experimenta la señal de retorno al reflejarse el sonido en partículas suspendidas o burbujas de gas contenidas en el fluido, es decir, las discontinuidades del fluido reflejan la onda ultrasónica emitida con una frecuencia ligeramente diferente que es proporcional al caudal del fluido. El método viene limitado por la necesidad de la presencia de partículas, pero permite medir algunos caudales de fluidos difíciles tales, como mezclas gas-líquido, fangos, etc.

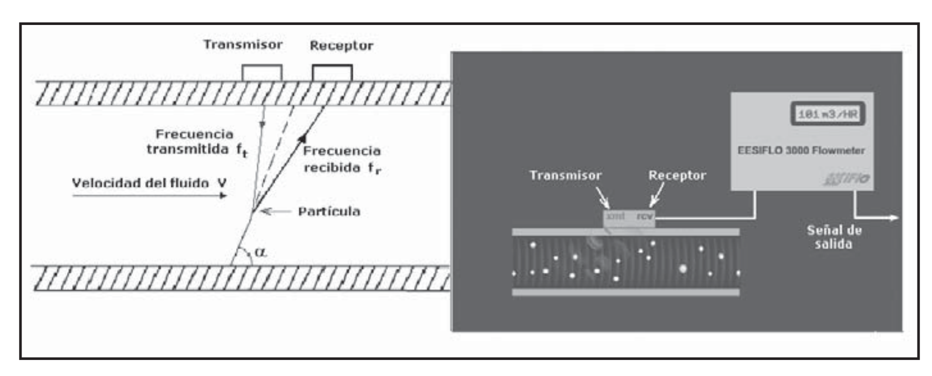


Figura 4.33 Medidor Doppler. Fuente: EESIFLO

Considerando que hay poca desviación entre la onda enviada y la reflejada por una partícula en el seno del líquido resulta:

Velocidad aguas arriba: $V = V_s - V \cos \alpha$

Velocidad aguas abajo: $V = V_s + V \cos \alpha$

Con:

V = velocidad media del fluido

V_s = velocidad del sonido en el fluido

α = ángulo de la trayectoria del sonido con el eje de la tubería

La relación entre las frecuencias reflejada y transmitida es:

$$f_r = f_t \times \frac{V_s + V \cos \alpha}{V_s - V \cos \alpha} = \frac{f_t}{V_s} \times \left(\frac{V_s + V \cos \alpha}{V_s} + V \cos \alpha \right) = f_t \times \frac{1 + 2V \cos \alpha}{V_s}$$

Habiendo considerado que $V < V_s$.

La deriva de frecuencias es:

$$\Delta f = f_r - f_t = V \times \frac{2 f_t \cos \alpha}{V_s} = k \times V$$

Donde la constante k es:

$$k = \frac{2 f_t \cos \alpha}{V_s}$$

Luego, la velocidad del fluido en la tubería es directamente proporcional al cambio de frecuencia entre las señales ultrasónicas transmitida y reflejada. Será necesario efectuar correcciones en la velocidad del sonido V_s, ya que depende de la presión y temperatura del fluido.

La indicación del instrumento depende, en gran medida ,de las propiedades físicas del líquido, tales como la conductividad sónica, la densidad y distribución de las partículas en suspensión, el perfil de los filetes del líquido en el flujo y los cambios en la densidad y la temperatura.

Su exactitud es del ± 2%. Se desaconseja el montaje del sensor en el exterior mediante abrazaderas en algunos materiales de tubería (cobre, hormigón, plástico y fibra de vidrio), ya que las discontinuidades existentes en el material pueden afectar la medida, de modo que la exactitud puede empeorar al ± 20%.

4.1.4 Fuerza (medidor de placa)

El *medidor de placa* (figura 4.34) consiste en una placa instalada directamente en el centro de la tubería y sometida al empuje o fuerza de impacto del fluido.

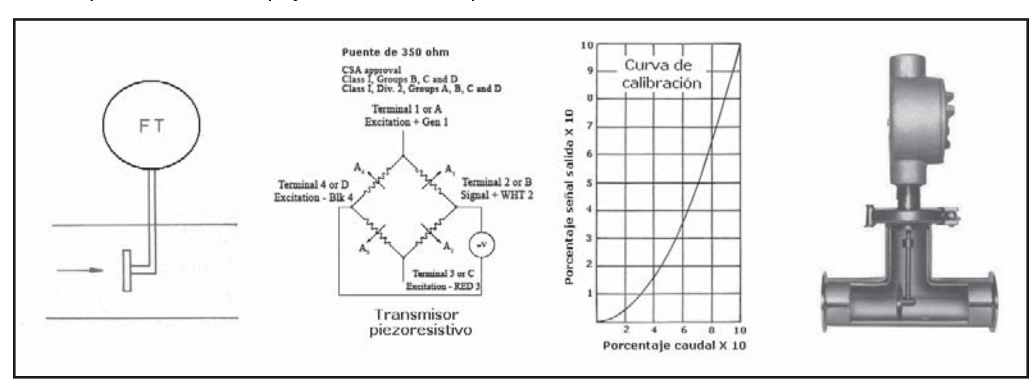


Figura 4.34 Medidor de placa. Fuente: Aliant

La fuerza originada es proporcional a la energía cinética del fluido y depende del área anular entre las paredes de la tubería y la placa. Corresponde a la siguiente ecuación:

$$F = \frac{v^2}{2g} \times \rho \times C_d \times A$$

en la que:

- F = fuerza total en la placa
- v = velocidad del fluido
- ρ = densidad del fluido
- C_d = constante experimental (coeficiente de rozamiento del disco)
- A = área de la placa

De aquí:

$$v = \sqrt{\frac{2gF}{\rho \times C_d \times A}}$$

El caudal volumétrico es:

$$Q = S \times v = S \times \sqrt{\frac{2gF}{\rho \times C_d \times A}}$$

Siendo S el área de la sección interior de la tubería.

El valor típico de la constante C_d es 1,28 para placas planas y de 0,07 a 0,5 para esferas.

La placa está conectada a un transmisor de equilibrio de fuerzas o piezoresistivo. La fuerza dinámica del fluido sobre la placa es transmitida a través de una palanca a un puente de Wheastone de cuatro galgas extensiométricas activas que proporciona una señal de salida de 4-20 mA c.c. compatible con el protocolo HART. Esta señal es proporcional a la fuerza de impacto del fluido sobre la placa y, a su vez, el caudal es proporcional a la raíz cuadrada de esta fuerza. Luego, la señal transmitida es proporcional a la raíz cuadrada del caudal, siendo independiente de la temperatura del fluido o de su presión estática.

Desde el punto de vista del mantenimiento conviene limpiar la placa en las paradas largas de la planta, en particular si el fluido es un producto pegajoso o bien es un producto alimenticio. Se han dado casos de que las abejas han proliferado en la placa impidiendo que esta pueda moverse en la puesta en marcha.

El instrumento permite medir caudales de fluidos sucios o corrosivos y fluidos con pequeñas cantidades de sólidos en suspensión. De hecho, puede medir caudales de cualquier tipo de líquido, gas o vapor que van de un mínimo de 0,3 l/min hasta 40.000 l/min. Tiene una alta fiabilidad y su vida útil alcanza los 20 millones de ciclos. La rangeabilidad es de 15:1 y la exactitud en la medida es del ± 1%. Su desventaja es la pérdida de carga producida por la placa.

4.1.5 Tensión inducida (medidor magnético)

4.1.5.1 Medidor magnético de caudal

La ley de Faraday establece que la tensión inducida a través de cualquier conductor, al moverse éste perpendicularmente a través de un campo magnético, es proporcional a la velocidad del conductor. La regla de la mano derecha nos indica que colocando la mano derecha abierta, con la palma perpendicular a las líneas de fuerza del campo magnético, y los dedos en el sentido de la corriente del fluido, el pulgar señala el sentido de la corriente inducida.

Faraday intentó aplicar esta teoría en la medición de la velocidad del río Támesis en 1832. Suponía que el agua del río circulaba perpendicularmente al campo magnético de la Tierra y que el agua era un conductor relativamente bueno. Sumergió una probeta en el agua y esperaba obtener una señal que variara directamente con la velocidad.

No tuvo éxito debido a que no disponía de indicadores sensibles y a que el campo magnético de la Tierra es bajo. No obstante, su teoría fue aceptada. Los holandeses fueron los primeros en el mundo que adaptaron este principio. En 1950 practicaron el bombeo de grandes cantidades de agua de una zona a otra en las tierras bajas de Holanda. Era importante tener una indicación del caudal para supervisar los caudales manejados. En 1950, cuando se desarrollaron ampliamente las técnicas más avanzadas de corriente alterna, se diseñaron amplificadores más fiables y económicos y, sólo entonces, pasó a utilizarse el medidor magnético de caudal en una gran variedad de aplicaciones industriales.

La fórmula del caudal que da la ley de Faraday de inducción electromagnética es la siguiente:

$$E = -N\frac{d\varphi}{dt} = -N\frac{d(B\times A)}{dt} = -N\times B\frac{dA}{dt} = -N\times B\times D\frac{dl}{dt} = -N\times B\times D\times v = K\times v$$

Siendo:

E = tensión generada en el conductor

N = número de espiras de la bobina

φ = flujo magnético

B = densidad del campo magnético

D = distancia entre los dos electrodos (longitud del conductor)

v = velocidad del movimiento del flujo de caudal

K = constante

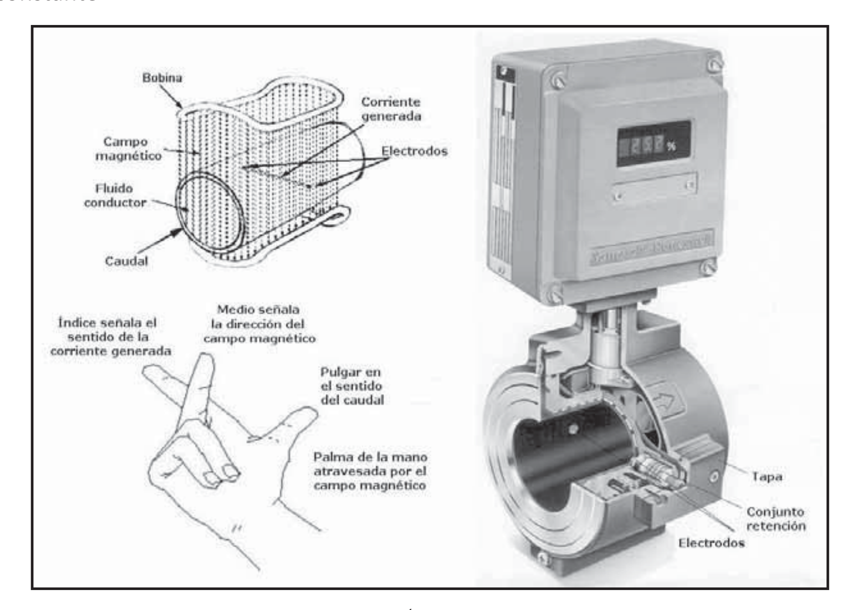


Figura 4.35 *Medidor magnético de caudal. Fuente: Honeywell*

El signo negativo indica que la corriente inducida crea otro campo magnético opuesto al campo magnético creado por la bobina (ley de Lenz).

La señal generada es captada por dos electrodos rasantes con la superficie interior del tubo y diametralmente opuestos, por lo que el medidor está libre de pérdidas de carga en el fluido. La fórmula indica que la tensión generada (voltios) es proporcional a la velocidad del flujo de caudal. Sin embargo, para que el instrumento pueda medir se requiere que el fluido tenga una conductividad eléctrica mayor de 3 μS/cm.

Asimismo, la constante K (y la señal generada) depende, no sólo de la velocidad del fluido sino también de la densidad del campo magnético B, la cual a su vez está influida por la tensión de la línea y por la temperatura del fluido.

Siendo:

$$Q = v\frac{\pi D^2}{4}$$

Resulta:

$$Q = K\frac{E_s}{B} \times D$$

Las fórmulas anteriores indican que la señal E_s depende, no sólo de la velocidad del fluido sino también de la densidad del campo magnético B, la cual a su vez está influida por la tensión de la línea y por la temperatura del fluido. Es obvio, que para obtener una señal que dependa únicamente de la velocidad, debe eliminarse la influencia de estos tres factores y, por otro lado, es muy difícil mantenerlos en valores constantes (la temperatura y la conductividad del fluido vienen dadas por las condiciones particulares de servicio).

De aquí que la señal de voltaje del medidor se compara en el receptor con otra tensión denominada "tensión de referencia E_r". Como las dos señales derivan a la vez del campo magnético B, la tensión de la línea y las variaciones de temperatura y de conductividad no influyen en la exactitud de la medida. La señal de referencia E_r se toma de un arrollamiento colocado en los bobinados de campo que genera el flujo magnético. En la figura 4.36 puede verse un esquema de conexiones del elemento de medida.

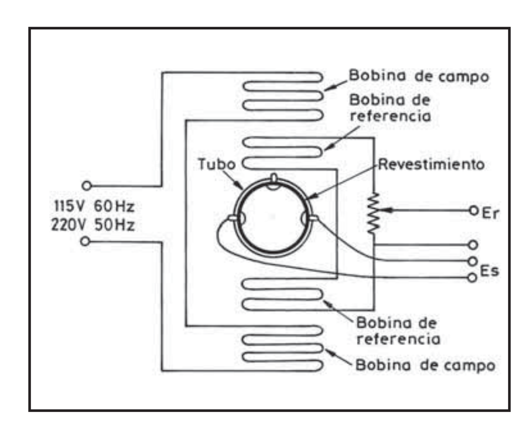


Figura 4.36 Elemento magnético de medida

El valor de E_r se escoge de tal forma que la relación E_s / E_r se hace constante en todos los medidores de caudal. De este modo se logra su intercambiabilidad con cualquier receptor. El valor de E_r transmitido al receptor puede establecerse con completa exactitud, gracias a un potenciómetro colocado, normalmente, en el medidor y fijado en fábrica para el valor máximo del caudal.

Las bobinas pueden ser alimentadas por una fuente de c.a. generándose así una señal de c.a. dentro del campo de microvoltios a milivoltios. El sistema se utiliza en particular en fluidos tales como aguas negras, líquidos viscosos y en la industria del papel (15% de las instalaciones). El sistema es fiable y rápido, pero presenta el inconveniente de precisar periódicamente de ajuste de cero con la tubería llena y sin flujo de caudal del líquido.

En el 85% de las instalaciones se utiliza una fuente de tensión continua que excita periódicamente las bobinas que generan el campo magnético, mediante impulsos de baja frecuencia (figura 4.37). El sistema toma una medida de la señal generada cuando las bobinas están excitadas, la almacena y toma una segunda medida cuando las bobinas están desexcitadas. Esta segunda medida es debi-

da al ruido de la instalación y se resta de la suma de la señal + ruido, con lo que se obtiene sólo la medida de la señal. El sistema establece el cero durante cada ciclo de desexcitación de las bobinas, de modo que se eliminan así la deriva del cero y el ajuste de cero. El sistema mejora la exactitud, que alcanza el ± 0,5% dentro de una rangeabilidad de 10:1.

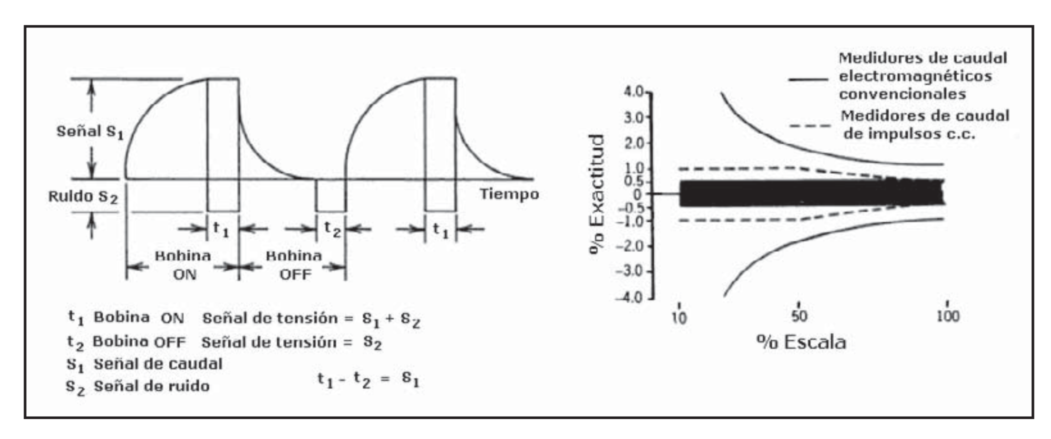


Figura 4.37 *Alimentación de impulsos de c.c. Fuente: J.G. Kopp y B.G. Liptak*

Una limitación que presenta la alimentación con c.c. es la lentitud de la respuesta, que suele ser de 0,2 a 2 segundos, y la sensibilidad a ruidos causados por aguas negras o por líquidos de baja conductividad.

El circuito de excitación de doble frecuencia (figura 4.38) soluciona el problema. Se excitan las bobinas con una corriente formada por dos componentes, uno de baja frecuencia (< 50 Hz) que garantiza una buena estabilidad del cero y otro de alta frecuencia que es inmune al ruido causado por fluidos de baja conductividad, alta viscosidad, fangos y reacciones electroquímicas.

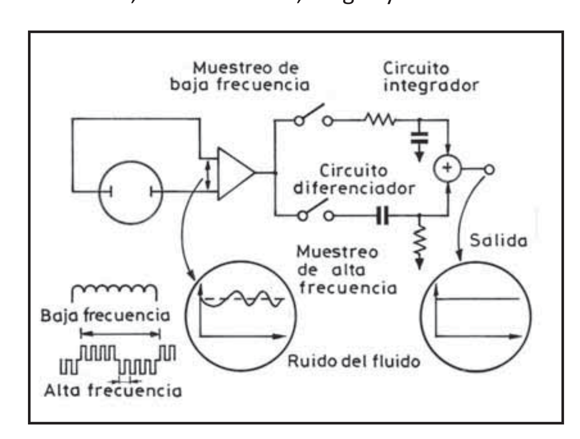


Figura 4.38 *Alimentación de las bobinas del campo magnético con dos ondas superpuestas*

La conductividad del fluido es la única característica propia del líquido que puede limitar el empleo del medidor magnético de caudal. El sistema electrónico, utilizado en el elemento y en el receptor, permite medir caudales de líquidos que tengan una conductividad superior a los 3 micromhios/cm. No obstante, en casos especiales, puede trabajarse con valores menores, añadiendo al circuito de

medida un preamplificador adicional (acondicionador de señal), alcanzándose una conductividad mínima de 0,3 micromhios/cm.

Con electrodos planos, sin contacto con el líquido, aislados dentro de las capas del material del revestimiento y acoplados capacitivamente con el proceso es posible medir caudales de líquidos con conductividades tan bajas como 0,05 micromhios/cm.

La conductividad eléctrica en los gases es generalmente mucho más baja, por lo que, el medidor magnético no puede emplearse para la medida de caudales de gases.

Fórmula	*Nombre*	*% en peso*	*Temp. °C*	*Conductividad micromhos/cm*
$AgNO_3$	Nitrato de plata	5 10 20 40 60	18	$2,56 \times 10^4$ $4,76 \times 10^4$ $8,72 \times 10^4$ $15,65 \times 10^4$ $21,01 \times 10^4$
$BaCl_2$	Cloruro de bario	5 10 15 24	18	$3,89 \times 10^4$ $7,33 \times 10^4$ $10,51 \times 10^4$ $15,34 \times 10^4$
$Ba(NO_3)_2$	Nitrato de bario	4,2 8,4	18	$2,09 \times 10^4$ $3,52 \times 10^4$
$Ba(OH_2)$	Hidróxido bárico	1,25 2,5	18	$2,50 \times 10^4$ $4,79 \times 10^4$
CH_3CO_2H	Ácido acético	0,3 1 5 10 20 30 40 50 60 70 99,7	18	$3,18 \times 10^2$ $5,84 \times 10^2$ $12,25 \times 10^2$ $15,26 \times 10^2$ $16,05 \times 10^2$ $14,01 \times 10^2$ $10,81 \times 10^2$ $7,40 \times 10^2$ $4,56 \times 10^2$ $2,35 \times 10^2$ 0,04
$AgNO_3$	Nitrato de plata	5 10 20 40 60	18	$2,56 \times 10^4$ $4,76 \times 10^4$ $8,72 \times 10^4$ $15,65 \times 10^4$ $21,01 \times 10^4$
$BaCl_2$	Cloruro de bario	5 10 15 24	18	$3,89 \times 10^4$ $7,33 \times 10^4$ $10,51 \times 10^4$ $15,34 \times 10^4$
$Ba(NO_3)_2$	Nitrato de bario	4,2 8,4	18	$2,09 \times 10^4$ $3,52 \times 10^4$
$Ba(OH_2)$	Hidróxido bárico	1,25 2,5	18	$2,50 \times 10^4$ $4,79 \times 10^4$
CH_3CO_2H	Ácido acético	0,3 1 5 10 20 30 40 50 60 70 99,7	18	$3,18 \times 10^2$ $5,84 \times 10^2$ $12,25 \times 10^2$ $15,26 \times 10^2$ $16,05 \times 10^2$ $14,01 \times 10^2$ $10,81 \times 10^2$ $7,40 \times 10^2$ $4,56 \times 10^2$ $2,35 \times 10^2$ 0,04

Fórmula	*Nombre*	*% en peso*	*Temp. °C*	*Conductividad micromhos/cm*
$C_2H_5CO_2H$	Ácido propiónico	1,00 5,01 10,08 20,02 30,03 50,09 69,99 100,00	18	$4,79 \times 10^2$ $9,25 \times 10^2$ $11,13 \times 10^2$ $10,42 \times 10^2$ $8,18 \times 10^2$ $3,77 \times 10^2$ 85 0,07
$C_3H_7CO_2H$	Ácido butírico	1,00 5,02 10,07 15,03 20,01 50,04 70,01 100	18	$4,55 \times 10^2$ $8,63 \times 10^2$ $9,86 \times 10^2$ $9,55 \times 10^2$ $8,88 \times 10^2$ $2,96 \times 10^2$ 56,00 0,06
$(CO_2H)_2$	Ácido oxálico	3,5 7,0	18	$5,08 \times 10^4$ $7,83 \times 10^4$
$CaCl_2$	Cloruro de calcio	5,0 10,0 20 25 30 35	18	$6,43 \times 10^4$ $11,41 \times 10^4$ $17,28 \times 10^4$ $17,81 \times 10^4$ $16,58 \times 10^4$ $13,66 \times 10^4$
$C_2H_5CO_2H$	Ácido propiónico	1,00 5,01 10,08 20,02 30,03 50,09 69,99 100,00	18	$4,79 \times 10^2$ $9,25 \times 10^2$ $11,13 \times 10^2$ $10,42 \times 10^2$ $8,18 \times 10^2$ $3,77 \times 10^2$ 85 0,07
$C_3H_7CO_2H$	Ácido butírico	1,00 5,02 10,07 15,03 20,01 50,04 70,01 100	18	$4,55 \times 10^2$ $8,63 \times 10^2$ $9,86 \times 10^2$ $9,55 \times 10^2$ $8,88 \times 10^2$ $2,96 \times 10^2$ 56,00 0,06
$(CO_2H)_2$	Ácido oxálico	3,5 7,0	18	$5,08 \times 10^4$ $7,83 \times 10^4$
$CaCl_2$	Cloruro de calcio	5,0 10,0 20 25 30 35	18	$6,43 \times 10^4$ $11,41 \times 10^4$ $17,28 \times 10^4$ $17,81 \times 10^4$ $16,58 \times 10^4$ $13,66 \times 10^4$

Tabla 4.9 Conductividad eléctrica de soluciones acuosas

Fórmula	Nombre	% en peso	Temp. °C	Conductividad micromhos/cm
HBr	Ácido bromhídrico	5	15	$19,08 \times 10^{4}$
		10		$35,49 \times 10^{4}$
		15		$49,40 \times 10^{4}$
HCO_2H	Ácido fórmico	4,94	18	$55,00 \times 10^{2}$
		9,55		$75,60 \times 10^{2}$
		20,34		$98,40 \times 10^{2}$
		29,83		$10,38 \times 10^{3}$
		39,95		$98,40 \times 10^{2}$
		50,02		$86,40 \times 10^{2}$
		70,06		$52,30 \times 10^{2}$
		89,02		$18,70 \times 10^{2}$
		100		$2,80 \times 10^{2}$
HCl	Ácido clorhídrico	5	15	$39,48 \times 10^{4}$
		10		$63,02 \times 10^{4}$
		20		$76,15 \times 10^{4}$
		30		$66,20 \times 10^{4}$
		40		$51,52 \times 10^{4}$
HF	Ácido fluorhídrico	0,004	18	$2,50 \times 10^{2}$
		0,007		$3,80 \times 10^{2}$
		0,015		$5,00 \times 10^{2}$
		0,030		$8,00 \times 10^{2}$
		0,060		$12,30 \times 10^{2}$
		0,121		$21,00 \times 10^{2}$
		0,242		$36,30 \times 10^{2}$
		0,484		$67,30 \times 10^{2}$
		1,50		$19,80 \times 10^{3}$
		2,48		$31,50 \times 10^{3}$
		4,80		$59,30 \times 10^{3}$
		7,75		$96,30 \times 10^{3}$
		40		$68,00 \times 10^{4}$
		50		$54,05 \times 10^{4}$
		60		$37,26 \times 10^{4}$
		65		$29,05 \times 10^{4}$
		70		$21,57 \times 10^{4}$
		75		$15,22 \times 10^{4}$
		80		$11,05 \times 10^{4}$
		85		$98,50 \times 10^{3}$
		86		$99,20 \times 10^{3}$
		87		$10,10 \times 10^{4}$
		88		$10,33 \times 10^{4}$
		89		$10,55 \times 10^{4}$
		90		$10,75 \times 10^{4}$
		91		$10,93 \times 10^{4}$
		92		$11,02 \times 10^{4}$
		93		$10,96 \times 10^{4}$
		94		$10,71 \times 10^{4}$
		95		$10,25 \times 10^{4}$
		96		$94,40 \times 10^{3}$
		97		$80,00 \times 10^{3}$
		99,4		$85,00 \times 10^{2}$
$HgBr_2$	Bromuro de mercurio	0,223	18	16
		0,422		26
$HgCl_2$	Cloruro de mercurio	0,229	18	44
		1,013		114
		5,08		421
KBr	Bromuro de potasio	5	15	$4,65 \times 10^{4}$
		10		$9,28 \times 10^{4}$
		20		$19,07 \times 10^{4}$
		30		$29,23 \times 10^{4}$
		36		$35,07 \times 10^{4}$

Fórmula	Nombre	% en peso	Temp. °C	Conductividad micromhos/cm
		15,85		$18,53 \times 10^{4}$
		24,5		$28,32 \times 10^{4}$
		29,8		$34,11 \times 10^{4}$
HI	Ácido yodhídrico	5	15	$13,32 \times 10^{4}$
HNO_3	Ácido nítrico	6,2	18	$31,23 \times 10^{4}$
		12,4		$54,18 \times 10^{4}$
		24,8		$76,76 \times 10^{4}$
		31,0		$78,19 \times 10^{4}$
		37,2		$75,45 \times 10^{4}$
		49,6		$63,41 \times 10^{4}$
		62,0		$49,04 \times 10^{4}$
H_3PO_4	Ácido fosfórico	10	15	$56,60 \times 10^{3}$
		20		$11,29 \times 10^{4}$
		30		$16,54 \times 10^{4}$
		35		$18,58 \times 10^{4}$
		50		$20,73 \times 10^{4}$
		70		$14,73 \times 10^{4}$
		80		$97,90 \times 10^{3}$
		85		$78,00 \times 10^{3}$
		87		$70,90 \times 10^{3}$
H_2SO_4	Ácido sulfúrico	5	18	$20,85 \times 10^{4}$
		10		$39,15 \times 10^{4}$
		15		$54,32 \times 10^{4}$
		20		$65,27 \times 10^{4}$
		25		$71,71 \times 10^{4}$
		30		$73,88 \times 10^{4}$
		35		$72,43 \times 10^{4}$
$K \cdot CH_3CO_2$	Acetato de potasio	4,67	15	$34,70 \times 10^{3}$
		9,33		$62,50 \times 10^{3}$
		28		$12,56 \times 10^{4}$
		46,67		$11,22 \times 10^{4}$
		65,33		$47,90 \times 10^{3}$
KCN	Cianuro potásico	3,25	15	$52,70 \times 10^{3}$
		6,5		$10,26 \times 10^{4}$
K_2CO_3	Carbonato potásico	5	15	$56,10 \times 10^{3}$
		10		$10,38 \times 10^{4}$
		20		$18,06 \times 10^{4}$
		30		$22,22 \times 10^{4}$
		40		$21,68 \times 10^{4}$
		50		$14,69 \times 10^{4}$
$K_2C_2O_4$	Oxalato de potasio	5	18	$48,80 \times 10^{3}$
		10		$91,50 \times 10^{3}$
KCl	Cloruro potásico	5	18	$69,00 \times 10^{3}$
		10		$13,59 \times 10^{4}$
		15		$20,20 \times 10^{4}$
		20		$26,77 \times 10^{4}$
		21		$28,10 \times 10^{4}$
KF	Fluoruro potásico	5	18	$65,20 \times 10^{3}$
		10		$12,09 \times 10^{4}$
		20		$20,80 \times 10^{4}$
		30		$25,61 \times 10^{4}$
		40		$25,22 \times 10^{4}$
KI	Yoduro potásico	5	18	$33,80 \times 10^{3}$
		10		$68,00 \times 10^{3}$

Tabla 4.9 Conductividad eléctrica de soluciones acuosas (continuación)

La selección de la longitud del cable de conexión entre el sensor y el convertidor depende de la conductividad del líquido.

Fórmula	*Nombre*	*% en peso*	*Temp. °C*	*Conductividad micromhos/cm*
		20		$14,55 \times 10^4$
		30		$23,03 \times 10^4$
		40		$31,68 \times 10^4$
		55		$42,26 \times 10^4$
KNO_3	Nitrato potásico	5	18	$45,40 \times 10^3$
		10		$83,90 \times 10^3$
		15		$11,86 \times 10^4$
		20		$15,05 \times 10^4$
		22		$16,25 \times 10^4$
KOH	Hidróxido potásico	4,2	15	$14,64 \times 10^4$
		8,4		$27,23 \times 10^4$
		16,8		$45,58 \times 10^4$
		25,2		$54,03 \times 10^4$
		33,6		$52,21 \times 10^4$
		42,0		$42,12 \times 10^4$
K_2S	Sulfuro potásico	3,18	18	$84,50 \times 10^3$
		4,98		$12,84 \times 10^4$
		9,93		$23,43 \times 10^4$
		19,96		$40,20 \times 10^4$
		29,97		$45,63 \times 10^4$
		38,08		$41,06 \times 10^4$
		47,26		$25,79 \times 10^4$
K_2SO_4	Sulfato potásico	5	18	$45,80 \times 10^3$
		10		$86,00 \times 10^3$
Li_2CO_3	Carbonato de litio	0,20	18	$34,30 \times 10^2$
		0,63		$88,50 \times 10^2$
$MgSO_4$	Sulfato magnésico	5	15	$26,30 \times 10^3$
		10		$41,40 \times 10^3$
		15		$48,00 \times 10^3$
		25		$41,50 \times 10^3$
$MnCl_2$	Cloruro de manganeso	5	15	$52,60 \times 10^3$
		10		$84,40 \times 10^3$
		15		$10,55 \times 10^4$
		20		$11,34 \times 10^4$
		25		$10,90 \times 10^4$
		28		$10,16 \times 10^4$
$Na \cdot CH_3CO_2$	Acetato de sodio	5	18	$29,50 \times 10^3$
		20		$65,10 \times 10^3$
		32		$56,90 \times 10^3$
Na_2CO_3	Carbonato de sodio	5	18	$45,10 \times 10^3$
		10		$70,50 \times 10^3$
		15		$83,60 \times 10^3$
$NaCl$	Cloruro sódico	5	18	$67,20 \times 10^3$
		10		$12,11 \times 10^4$
		15		$16,42 \times 10^4$
		20		$19,57 \times 10^4$
		25		$21,35 \times 10^4$
		26		$21,51 \times 10^4$
NaI	Yoduro sódico	5	18	$29,80 \times 10^3$
		10		$58,10 \times 10^3$
		20		$11,44 \times 10^4$
		40		$21,11 \times 10^4$

Fórmula	*Nombre*	*% en peso*	*Temp. °C*	*Conductividad micromhos/cm*
$LiCl$	Cloruro de litio	2,5	18	$41,00 \times 10^3$
		5		$73,30 \times 10^3$
		10		$12,18 \times 10^4$
		20		$16,76 \times 10^4$
		30		$13,99 \times 10^4$
		40		$84,40 \times 10^4$
LiI	Yoduro de litio	5	18	$29,60 \times 10^3$
		10		$57,30 \times 10^3$
		20		$10,94 \times 10^4$
		25		$13,46 \times 10^4$
$LiOH$	Hidróxido de litio	1,25	18	$78,10 \times 10^3$
		2,5		$14,16 \times 10^4$
		5,0		$23,96 \times 10^4$
		7,5		$29,99 \times 10^4$
Li_2SO_4	Sulfato de litio	5	15	$40,00 \times 10^3$
		10		$61,00 \times 10^3$
$MgCl_2$	Cloruro de magnesio	5	18	$68,30 \times 10^3$
		10		$11,28 \times 10^4$
		20		$14,02 \times 10^4$
		30		$10,61 \times 10^4$
		34		$76,80 \times 10^3$
$Mg(NO_3)_2$	Nitrato de magnesio	5	18	$43,80 \times 10^3$
		10		$77,00 \times 10^3$
		17		$11,02 \times 10^3$
$NaNO_3$	Nitrato sódico	5	18	$43,60 \times 10^3$
		10		$78,20 \times 10^3$
		20		$13,03 \times 10^4$
		30		$16,06 \times 10^4$
$NaOH$	Hidróxido sódico	1	18	$46,50 \times 10^3$
		2		$88,70 \times 10^3$
		4		$16,28 \times 10^4$
		6		$22,42 \times 10^4$
		8		$27,29 \times 10^4$
		10		$30,93 \times 10^4$
		15		$34,90 \times 10^4$
		20		$32,84 \times 10^4$
		25		$27,17 \times 10^4$
		27,5		$23,86 \times 10^4$
		30		$20,74 \times 10^4$
		32,5		$17,98 \times 10^4$
		35		$15,60 \times 10^4$
		37,5		$13,61 \times 10^4$
		40		$12,06 \times 10^4$
		45		$97,70 \times 10^3$
		50		$82,00 \times 10^3$
Na_2S	Sulfuro sódico	2,02	18	$61,20 \times 10^3$
		5,03		$13,21 \times 10^4$
		9,64		$20,17 \times 10^4$
		14,02		$23,59 \times 10^4$
		16,12		$22,43 \times 10^4$
		18,15		$21,84 \times 10^4$
Na_2SO_4	Sulfato sódico	5	18	$40,90 \times 10^3$
		10		$68,70 \times 10^3$
		15		$88,60 \times 10^3$

Tabla 4.9 Conductividad eléctrica de soluciones acuosas (continuación)

Con el fin de poder evaluar las características conductivas de cada medio, la tabla 4.9 facilita las conductividades de diversas soluciones acuosas.

Fórmula	Nombre	% en peso	Temp. °C	Conductividad micromhos/cm
NH_3	Amoníaco	0,10 0,40 0,80 1,60 4,01 8,03 16,15 30,5	15	$2{,}51 \times 10^2$ $4{,}92 \times 10^2$ $6{,}57 \times 10^2$ $8{,}67 \times 10^2$ $10{,}95 \times 10^2$ $10{,}38 \times 10^2$ $6{,}32 \times 10^2$ $1{,}93 \times 10^2$
NH_4Cl	Cloruro amónico	5 10 15 20 25	18	$91{,}80 \times 10^3$ $17{,}76 \times 10^4$ $25{,}86 \times 10^4$ $33{,}65 \times 10^4$ $40{,}25 \times 10^4$
NH_4I	Yoduro amónico	10 20 50	18	$77{,}20 \times 10^3$ $15{,}99 \times 10^4$ $42{,}00 \times 10^4$
NH_4NO_3	Nitrato amónico	5 10 30 50	15	$59{,}00 \times 10^3$ $11{,}17 \times 10^4$ $28{,}41 \times 10^4$ $36{,}33 \times 10^4$
$(NH_4)_2SO_4$	Sulfato amónico	5 10 20 30 31	15	$55{,}20 \times 10^3$ $10{,}10 \times 10^4$ $17{,}79 \times 10^4$ $22{,}92 \times 10^4$ $23{,}21 \times 10^4$
$Pb(NO_3)_2$	Nitrato de plomo	5 10 15 20 25 30	15	$19{,}10 \times 10^3$ $32{,}20 \times 10^3$ $42{,}90 \times 10^3$ $52{,}10 \times 10^3$ $60{,}00 \times 10^3$ $66{,}80 \times 10^3$
$SrCl_2$	Cloruro de estroncio	5 10 15 22	18	$48{,}30 \times 10^3$ $88{,}60 \times 10^3$ $12{,}31 \times 10^4$ $15{,}83 \times 10^4$
$Sr(NO_3)_2$	Nitrato de estroncio	5 10 15 20 25 35	15	$30{,}90 \times 10^3$ $52{,}70 \times 10^3$ $69{,}00 \times 10^3$ $80{,}20 \times 10^3$ $86{,}60 \times 10^3$ $86{,}10 \times 10^3$
$ZnCl_2$	Cloruro de cinc	2,5 5 10 20 30 40 60	15	$27{,}60 \times 10^3$ $48{,}30 \times 10^3$ $72{,}70 \times 10^3$ $91{,}20 \times 10^3$ $92{,}60 \times 10^3$ $84{,}50 \times 10^3$ $36{,}90 \times 10^3$
$ZnSO_4$	Sulfato de cinc	5 10 15 25 30	18	$19{,}10 \times 10^3$ $32{,}10 \times 10^3$ $41{,}50 \times 10^3$ $48{,}00 \times 10^3$ $44{,}40 \times 10^3$

Cortesía de Brooks Instruments.

Tabla 4.9 Conductividad eléctrica de soluciones acuosas (final)

En planta existen muchas fuentes de señales de ruido que pueden perturbar el funcionamiento de los medidores magnéticos de caudal. Por ejemplo, un motor eléctrico de gran potencia colocado en las inmediaciones del elemento genera un campo magnético que puede superponerse al flujo propio del medidor. Este tipo de ruido queda eliminado gracias al sistema de tensión de referencia E_r que ya se ha descrito anteriormente (figura 4.36).

Una fuente de ruido de baja frecuencia, en particular en líquidos de alta viscosidad y en líquidos con aditivos químicos, es el choque de las partículas en suspensión contra los electrodos, lo que se soluciona con una fuente de alimentación de c.a. de alta frecuencia que es inmune al ruido de baja frecuencia.

Asimismo, los restantes motores y las líneas eléctricas de potencia pueden generar corrientes y tensiones eléctricas en las tuberías de la planta, siendo estas señales captadas por el medidor en forma de señales de tensión. Al objeto de reducir la influencia de estas señales de ruido se conectan eléctricamente en *by-pass* las bridas de conexión del medidor y se ponen a masa. Sin embargo, la práctica ha demostrado que esta medida es insuficiente y muchos fabricantes han dispuesto sistemas en el receptor para eliminar dichas señales de ruido.

Es obvio que, siendo el ruido dependiente en gran parte de la situación del medidor y de la utilización continua o intermitente del equipo parásito, el sistema de compensación debe ser corregido una vez variadas las condiciones. Sin embargo, existe un sistema que evita dichas correcciones: consiste en introducir un tercer electrodo en el medidor y conectarlo a masa. De este modo, la unidad de medida está puesta a tierra con relación a dichas señales de ruido y es completamente insensible a las mismas, sin que sea necesario hacer ajustes de posición en la instalación (figura 4.39).

En la sección de medida se generan corrientes parásitas en el líquido, debido al campo magnético de corriente alterna. Estas corrientes, a su vez, generan un campo magnético y una tensión. Este campo magnético se opone al principal generado en los bobinados de campo y, por lo tanto, hace variar la densidad del flujo. La compensación de esta variación de flujo la llevan a cabo, automáticamente los bobinados de referencia descritos en la figura 4.35. Por otro lado, la tensión generada aparece como una señal en los electrodos y es captada por el receptor. Su magnitud depende de la densidad del flujo magnético y de la conductividad del fluido, y está desfasada con relación a la señal de velocidad del líquido. Como este desfase perturba el trabajo del sistema, es esencial anular esta señal.

Algunos fabricantes compensan este fenómeno de desfase empleando cables de conexión rígidos y con curvatura especial en los electrodos o bien compensándolo en el receptor. El primer método es difícil y la posición de los cables es extremadamente crítica. Por otro lado, la compensación en el receptor cambia completamente la intercambiabilidad entre los elementos primarios y el receptor, ya que la magnitud de esta señal desfasada es distinta para cada medidor y, por consiguiente, si se sustituye el medidor de caudal es necesario el reajuste del receptor.

Otros fabricantes emplean un arrollamiento cerrado con un potenciómetro de equilibrio en cada electrodo. Los bucles formados están situados en el campo magnético del instrumento y, en la misma forma que un transformador, generan una tensión que está desfasada 90" con relación a la señal de velocidad del fluido. En el potenciómetro se toma una parte de esta tensión para compensar la señal de ruido desfasada. Las conexiones eléctricas, en el elemento primario, están dispuestas de tal modo que la tensión inducida en el bucle del electrodo se suma a la señal de desfase.

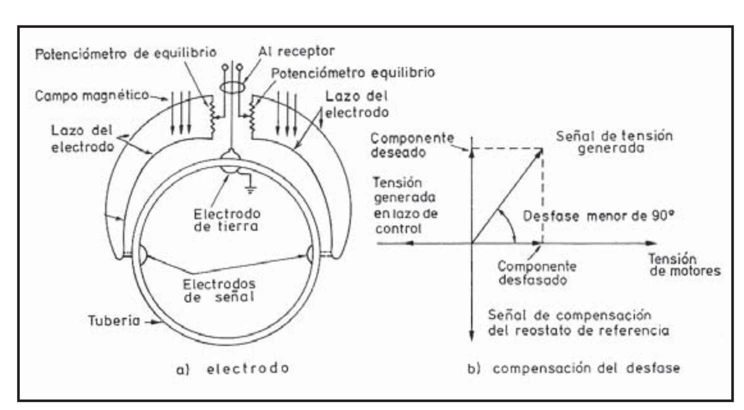


Figura 4.39 *Electrodo de puesta a masa*

Los tamaños de los tubos de medida varían desde 0,1" hasta 72", con diferentes capacidades.

Al medidor magnético de caudal se le pueden acoplar instrumentos para conseguir las siguientes funciones auxiliares, que también puede aportar directamente el convertidor a microprocesador:

- Indicación con una escala lineal de 0-100% de la escala.
- Transmisión neumática.
- Transmisión electrónica.
- Transmisión telemétrica con un transmisor de impulsos.
- Autocomprobación automática con diagnósticos de fallo.
- Módulo de comunicaciones.

- Integración.
- Registro.

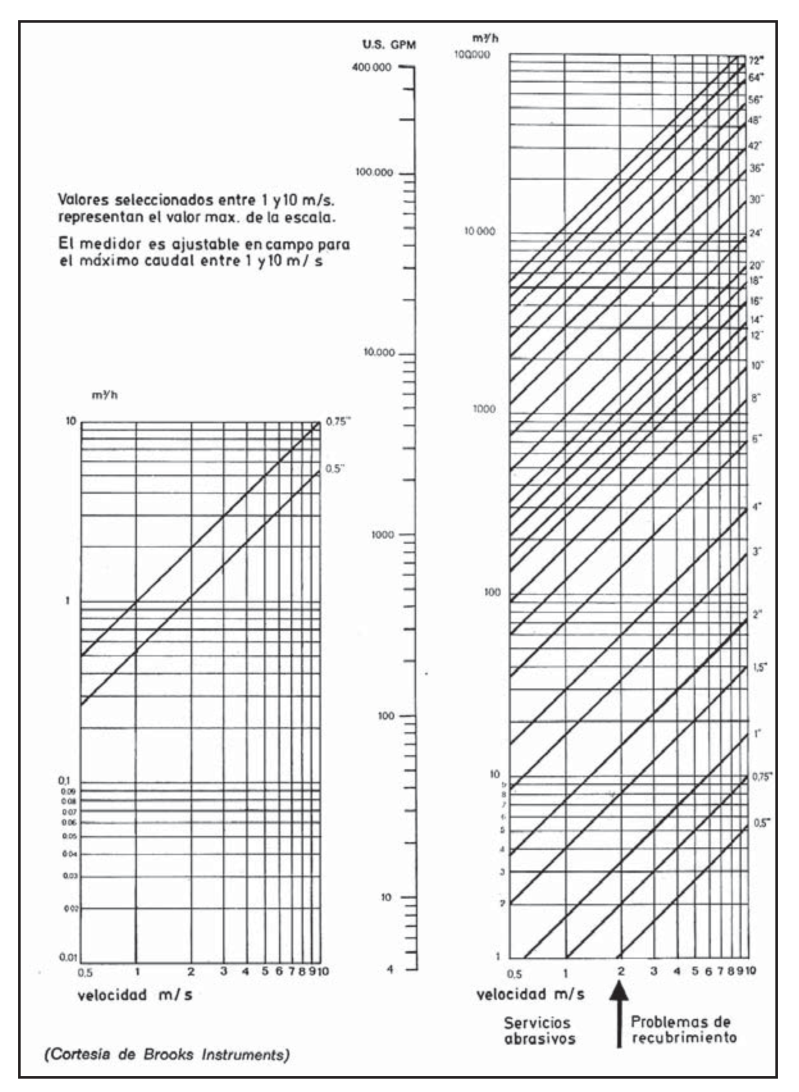


Figura 4.40 Capacidades de los medidores magnéticos de caudal

Los electrodos del tubo de medida deben seleccionarse de acuerdo con su resistencia a la corrosión o a la abrasión en el caso de aplicaciones químicas En la tabla 4.10 se indican los materiales empleados y su resistencia, debiendo señalar que el material más utilizado es el acero inoxidable 316.

Como materiales opcionales se emplean el Hastelloy para soluciones corrosivas a temperaturas y concentraciones bajas, la aleación Haynes con fangos abrasivos, el platino frente a soluciones ácidas, el tantalio para la mayor parte de los ácidos con independencia de su concentración y, finalmente, el titanio frente a ácidos fuertemente concentrados a altas temperaturas y a bases.

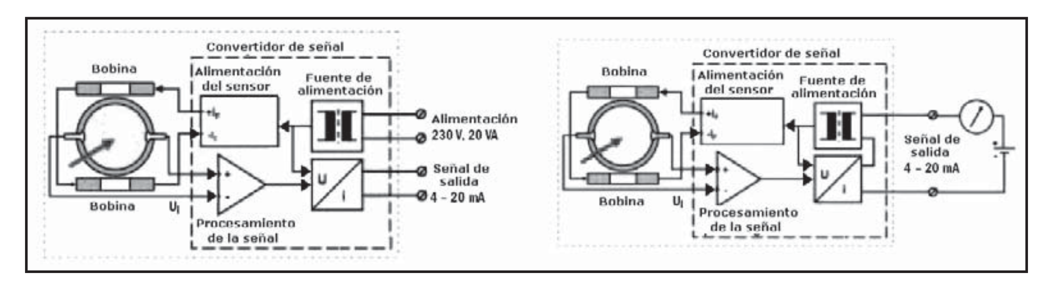


Figura 4.41 Transductor de 4-20 mA c.c.

Materiales del cuerpo	Materiales de los electrodos				Material revestimiento			
Material	Material	Resistencia a la abrasión	Resistencia a la corrosión	Aplicaciones	Material	Resistencia a la abrasión	Resistencia a la corrosión	Aplicaciones
Poliuretano	Inox 316	Media	Buena	El más utilizado	Teflón (PTFE & PFA)	Media	Excelente	Ácidos, jarabes, licores. No recomendado en ClH y FH
PTFE/PFA	Hastelloy B y C	Media	Buena	Soluciones corrosivas a temperaturas bajas	Poliuretano	Excelente	Media (vulnerable)	Fangos, aguas negras
Goma resistente a la abrasión	Haynes Alloy 25	Excelente	Media	Fangos abrasivos	Goma	Excelente	Media (vulnerable)	Fangos medios, agua
Neopreno	Platino	Pobre	Excelente	Soluciones ácidas	Neopreno	Excelente	Media (vulnerable)	Agua natural y tratada, agua caliente y fría
Ebonita (goma dura)	Tantalio	Media	Buena	Ácidos	Vidrio	Pobre	Excelente	Ácidos, productos alimenticios
AISI 304	Titanio	Buena	Buena	Ácidos fuertemente concentrados a altas temperaturas y bases	Fibra de vidrio (tubo de medida)	Media	Excelente	Pasta de papel, aguas negras, ClH
Acero al carbono	Monel	Buena	Buena	Generales	Cerámica	Excelente	Media (vulnerable)	Fluidos a bajas temperaturas

Tabla 4.10 Materiales utilizados en los medidores de caudal electromagnéticos

Si la velocidad del fluido supera los 2-3 m/s es conveniente colocar un diafragma de protección en la entrada del elemento para prevenir su erosión. El diámetro interno del orificio del diafragma debe ser el mismo que el del revestimiento y la velocidad del fluido no debe exceder los 5 m/s para prevenir un desgaste excesivo del revestimiento. Para disminuir la velocidad puede instalarse un medidor mayor que el diámetro de la tubería, teniendo presente que la velocidad no debe bajar a menos de 1 m/s para el valor máximo de la escala.

El fluido puede llevar sustancias que por su naturaleza química pueden recubrir el tubo, los electrodos o ambos. El recubrimiento de los electrodos se presenta, en particular, en los procesos en que se añaden numerosos aditivos. En algunos casos, dicho recubrimiento no da lugar a errores importantes siempre que las sustancias se depositen concéntricamente y no aíslen eléctricamente el electrodo del fluido.

Si el tubo se va recubriendo concéntricamente hasta que el área interna sea la mitad, la velocidad se duplicará para mantener el mismo caudal; por otro lado, el diámetro disminuirá en un factor de 0,707. Por consiguiente, el instrumento indicará teóricamente una tensión distinta deducida de la fórmula:

$$E = -N \times B \times d \times v$$

Es decir:

$$E = -N \times B \times d \times v = -N \times B \times 0{,}707 \times 2 \times v = -1{,}414 \times N \times B \times D \times v$$

Sin embargo, la práctica ha demostrado que, al tener el recubrimiento la misma conductividad que el líquido, la resistencia en *shunt* formada compensa el aumento de tensión y el instrumento señala aproximadamente el caudal correcto.

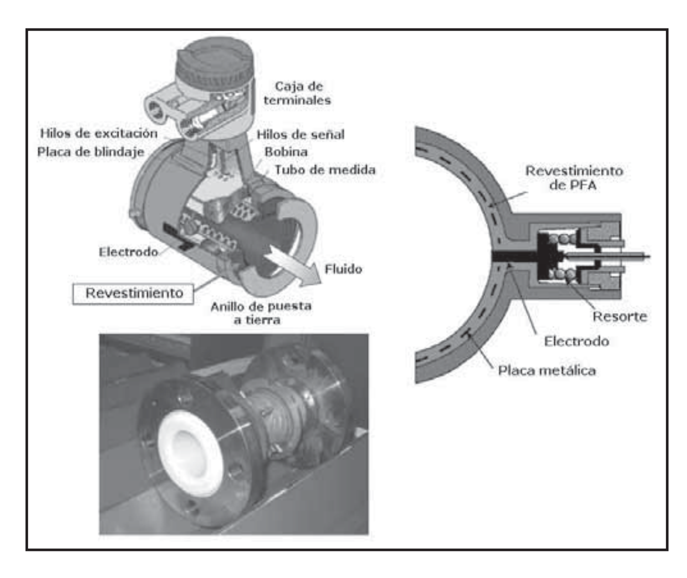


Figura 4.42 *Revestimiento y electrodos*

La mayor parte de las sustancias depositadas tienen la misma conductividad que el fluido, ya que permanecen en forma de pasta húmeda. Sin embargo, cuando dichas sustancias son aislantes bastará una película delgada para que el instrumento marque cero.

Entre estas dos situaciones pueden obtenerse resultados cualesquiera. Algunos de estos problemas se solucionan utilizando varios tipos de dispositivos limpiadores y calefactores de tubos.

El dispositivo ultrasónico consiste en un generador ultrasónico que hace vibrar los electrodos con vibraciones de alta frecuencia (65 ± 10 kHz) y baja amplitud que contrarrestan la tendencia de los electrodos a recubrirse, o bien remueven determinados depósitos que pueden interferir con la medida de caudal.

El sistema de limpieza de baja tensión consiste en aplicar una baja tensión a los electrodos mientras se cortocircuita la señal de entrada al transmisor para su protección. La baja tensión y corriente aplicadas al electrodo remueven los depósitos de películas de grasa o de las sustancias depositadas en los electrodos.

Aunque estos sistemas no impiden que se depositen sustancias en la tubería y, por lo tanto, no eliminan estas fuentes de error, si que alargan los periodos de tiempo de mantenimiento.

La calefacción exterior de los tubos puede efectuarse mediante cintas de resistencias alimentadas eléctricamente y controladas por medio de un termostato. La calefacción que se consigue en el tubo impide el depósito de grasa o de sólidos en las paredes del tubo, tanto en marcha como en la parada de la instalación, gracias a la temperatura controlada conseguida con el termostato.

En otros sistemas, los electrodos disponen de un sello de presión y están contenidos en una unidad fácil de desmontar, lo que permite limpiar o sustituir los electrodos sin necesidad de desmontar el tubo de medida de la tubería.

El medidor puede montarse inclinado u horizontal siempre que se mantenga la tubería llena de líquido durante la medida. Si la instalación es inclinada es conveniente colocar una válvula aguas abajo para asegurar que la tubería esté llena para todos los caudales de líquido que puedan pasar a través. No obstante, si el sistema de bombeo se para, el nivel del líquido en el elemento deja de bañar los electrodos, abriéndose el circuito y dando una señal de salida errónea. Algunos fabricantes modifican ligeramente el circuito para que el índice del instrumento receptor señale cero cuando el circuito está abierto. Los instrumentos digitales detectan automáticamente el estado sin líquido de la tubería.

Generalmente, no se requiere una longitud recta de tubería antes del medidor de caudal. Sin embargo, la existencia de accesorios que pueden provocar la formación de filetes de caudal asimétricos, obliga a situar el elemento unos 5 diámetros de tubería o más a partir de la conexión aguas arriba. Asimismo, cuando el elemento está colocado en la impulsión de una bomba se recomienda una separación de unos 8 diámetros de tubería.

Los fluidos que contienen partículas magnéticas en suspensión pueden medirse con un medidor magnético de caudal siempre que las partículas estén en suspensión homogénea al pasar a través del elemento. Se consigue, generalmente, instalando el medidor en una tubería vertical en la que las partículas magnéticas adoptarán una distribución uniforme en la sección transversal de la tubería.

Los medidores de caudal no requieren, normalmente, ajustes antes de la puesta en marcha. Los ajustes y la calibración necesarios se han llevado a cabo ya en la fábrica. Una vez que el instrumento está instalado y completadas todas las conexiones eléctricas, el medidor de caudal está listo para servicio. Basta llenar completamente la tubería con líquido y conectar el instrumento a la corriente permitiendo un tiempo para que el sistema se caliente y se estabilice.

Los elementos magnéticos de caudal se calibran en fábrica utilizando un sistema dinámico de pesada y consiguiéndose así una precisión elevada del ± 0,1%.

Con el sistema completo, incluyendo el receptor, se obtiene una exactitud del 1% de toda la escala, pudiéndose llegar a una mayor exactitud, del orden del ± 0,5%, con una calibración especial y siempre que la conductividad sea elevada. El campo de medida entre el caudal máximo y el mínimo puede llegar a 100:1 con una escala de lectura lineal. La fidelidad del conjunto es del ± 0,25%. La gama de velocidades varía de 0,1 a 10 m/s.

La adición de un microprocesador mejora sustancialmente las funciones de inteligencia del medidor magnético de caudal. Su exactitud pasa al ± 0,5% gracias al circuito de alta frecuencia y al filtrado digital de la señal que elimina las interferencias de los depósitos de sólidos en la tubería. La relación entre el campo de medida máximo al mínimo es de 100:1, se dispone de autodiagnóstico del aparato, de detección automática del estado sin líquido de la tubería, y de capacidad para medir, manual o automáticamente, el caudal en los dos sentidos de circulación del fluido. Pueden seleccionarse las unidades de ingeniería de lectura que se deseen y disponer de doble campo de medida, seleccionable manual o automáticamente.

Los medidores magnéticos de caudal son adecuados para la medida de caudales de líquidos conductores, en particular los líquidos fangosos y fluidos corrosivos. Su pérdida de carga es baja y corresponde a la de una tubería del mismo diámetro y de la misma longitud. Pueden medir caudales,

en ambos sentidos de paso, del fluido en la tubería. Tienen un bajo mantenimiento ya que carecen de partes móviles. Su rangeabilidad es de 100:1. Presentan el inconveniente de que la conductividad del fluido debe ser, como mínimo, de 3 μS/cm en la mayor parte de los casos.

4.1.6 Desplazamiento positivo

Los *medidores de desplazamiento positivo* miden el caudal, en volumen, contando o integrando volúmenes separados del líquido. Las partes mecánicas del instrumento se mueven aprovechando la energía del fluido y dan lugar a una pérdida de carga. La exactitud depende de los huelgos entre las partes móviles y las fijas y aumenta con la calidad de la mecanización y con el tamaño del instrumento.

Para una medición correcta, estos medidores no precisan de longitudes rectas aguas arriba y aguas abajo del propio medidor. Existen cuatro tipos básicos de medidores:

- Disco oscilante.
- Pistón oscilante.
- Pistón alternativo.
- Rotativos.

4.1.6.1 Medidor de disco basculante

El instrumento dispone de una cámara circular con un disco plano móvil dotado de una ranura en la que está intercalada una placa fija. Esta placa separa la entrada de la salida e impide el giro del disco durante el paso del fluido. La cara baja del disco está siempre en contacto con la parte inferior de la cámara en el lado opuesto, de modo que la cámara queda dividida en compartimientos móviles separados de volumen conocido.

Cuando pasa el fluido, el disco toma un movimiento parecido al de un trompo caído, de modo que cada punto de su circunferencia exterior sube y baja alternativamente, estableciendo contacto con las paredes de la cámara desde su parte inferior a la superior. Este movimiento de bamboleo se transmite mediante una bola y el eje del disco a un tren de engranajes (figura 4.43). El par disponible es pequeño, lo que pone un límite en la utilización de accesorios mecánicos. Empleado originalmente en aplicaciones domésticas para agua, se utiliza industrialmente en la medición de caudales de agua fría, agua caliente, aceite y líquidos alimenticios. La exactitud es del ± 1% al ± 5%. La presión máxima es de 100 bar y el caudal máximo es de 600 l/min y se fabrica para pequeños tamaños de tubería.

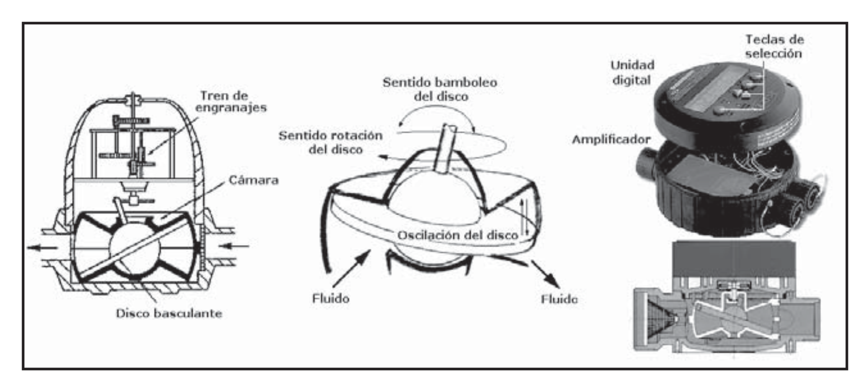


Figura 4.43 Medidor de disco basculante

4.1.6.2 Medidor de pistón oscilante

El instrumento (figura 4.44) se compone de una cámara de medida cilíndrica con una placa divisora que separa los orificios de entrada y de salida. La única parte móvil es un pistón cilíndrico que oscila suavemente, en un movimiento circular, entre las dos caras planas de la cámara, y que está provisto de una ranura que se desliza en la placa divisora fija y que hace de guía del movimiento oscilante. El eje del pistón, al girar, transmite su movimiento a un tren de engranajes y a un contador. El par disponible es elevado de modo que el instrumento puede accionar los accesorios mecánicos que sean necesarios y transmitir mediante un transmisor de impulsos.

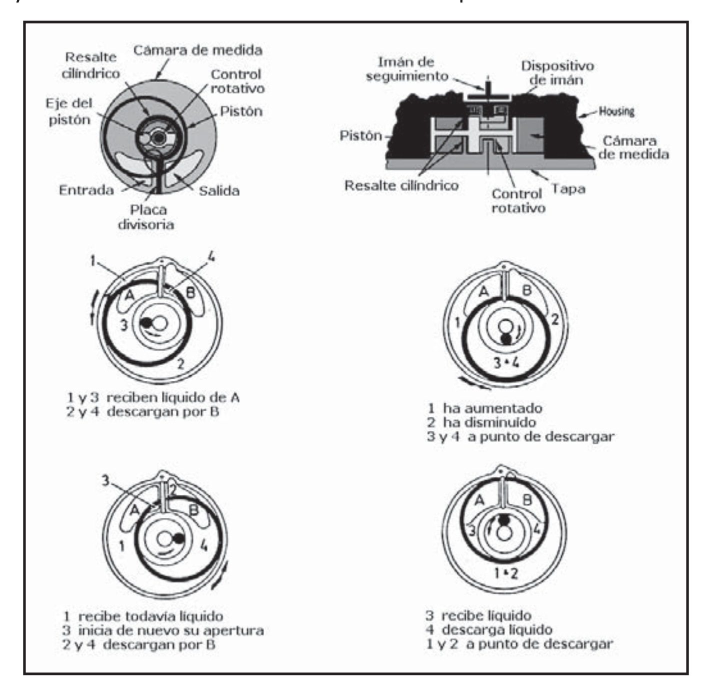


Figura 4.44 Medidor de pistón oscilante

Los diagramas adjuntos (figura 4.44) indican el movimiento del pistón desde que entra el líquido en la cámara hasta que ha sido medido y descargado.

La exactitud normal es del ± 1%,pudiéndose llegar al ± 0,2% con pistón metálico y ± 0,5% con pistón sintético, dentro de un margen de caudal de 5:1. Se fabrican para tamaños de tubería de hasta 3" con caudales máximos de 1.200 l/min y presiones máximas de 20 bar. Se aplican en la medición de caudales de agua y de líquidos viscosos o corrosivos.

4.1.6.3 Medidor de pistón alternativo

El *medidor de pistón convencional* (figura 4.45) es el más antiguo de los medidores de desplazamiento positivo. El instrumento se fabrica en muchas formas: de varios pistones, pistones de doble acción, válvulas rotativas, válvulas deslizantes, horizontales. Estos instrumentos se han empleado mucho en la industria petroquímica y pueden alcanzar una precisión del ± 0,2%.

Su capacidad es pequeña comparada con los tamaños de otros medidores. Su costo inicial es alto, dan una pérdida de carga alta y son difíciles de reparar.

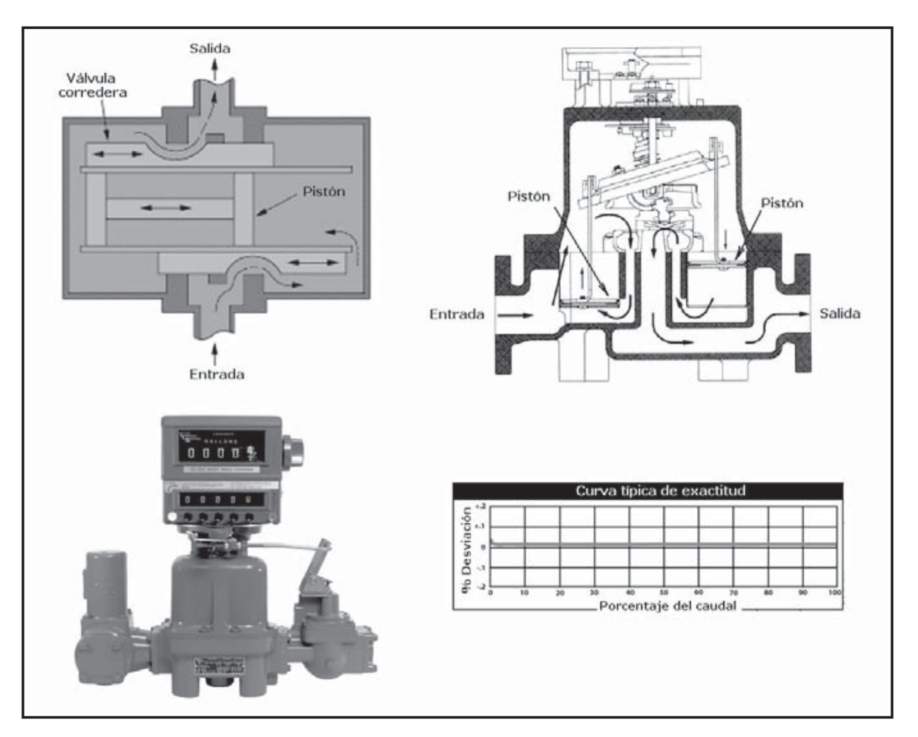


Figura 4.45 Medidor de pistón alternativo. Fuente: Total Control System

4.1.6.4 Medidor rotativo

Este tipo de instrumento tiene válvulas rotativas que giran excéntricamente rozando con las paredes de una cámara circular y transportan el líquido, en forma incremental, de la entrada a la salida. Se emplean mucho en la industria petroquímica para la medida de crudos y de gasolina, con intervalos de medida que van de unos pocos l/min de líquidos limpios de baja viscosidad hasta 64.000 l/min de crudos viscosos.

Hay varios tipos de medidores rotativos, siendo los cicloidales, los de dos rotores (birrotor) y los ovales los más empleados.

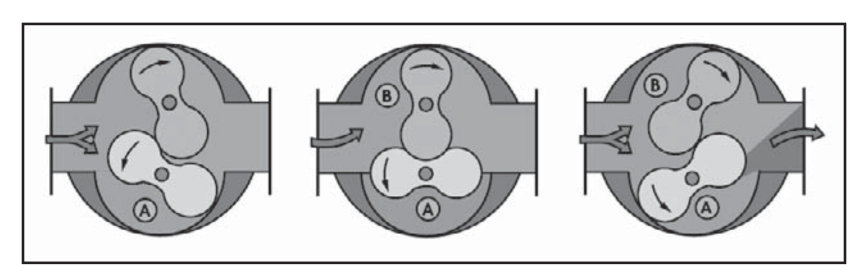


Figura 4.46 Medidor cicloidal - lóbulos Root

Los *cicloidales* (figura 4.46) contienen dos lóbulos del tipo Root engranados entre sí, que giran en direcciones opuestas, manteniendo una posición relativa fija y desplazando un volumen fijo de fluido líquido o gas en cada revolución.

Se fabrican en tamaños que van de 2 a 24" y con caudales de líquidos de 30 a 66.500 l/min, y en gas hasta 3 Nm^3/h. Su exactitud es del ± 1% para caudales del 10% al 100% del intervalo de medida, bajando mucho la precisión en caudales bajos debido a los huelgos que existen entre los lóbulos.

El sistema *birrotor* (figura 4.47) consiste en dos rotores, sin contacto mecánico entre sí, que giran como únicos elementos móviles en la cámara de medida. La relación de giro mutuo se mantiene gracias a un conjunto de engranajes helicoidales totalmente cerrado y sin contacto con el líquido. Los rotores están equilibrados, estática y dinámicamente, y se apoyan en rodamientos de bolas de acero inoxidable.

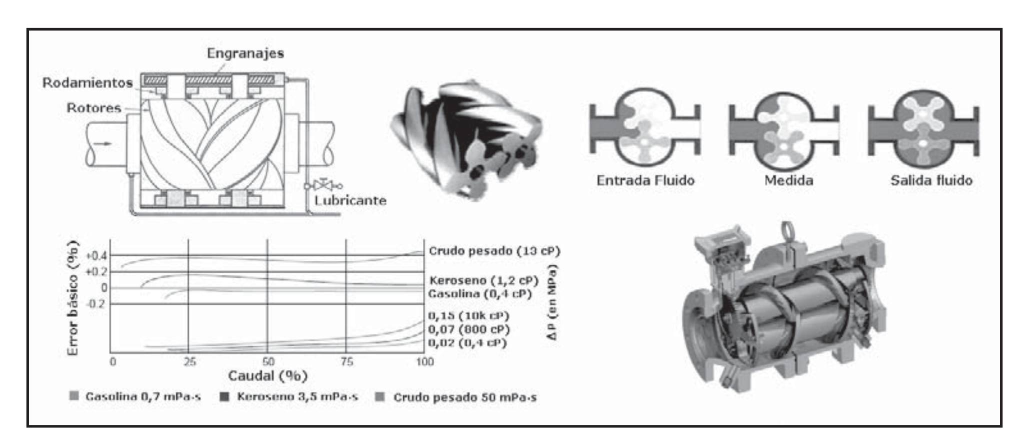


Figura 4.47 Medidor birrotor

Al no existir contacto mecánico entre los rotores, la vida útil es larga y el mantenimiento es fácil. El instrumento puede trabajar con bajas presiones diferenciales del orden de 1" c. de a.

Son reversibles, admiten sobrevelocidades esporádicas sin recibir daño alguno, no requieren filtros, admiten el paso de partículas extrañas y permiten desmontar fácilmente la unidad de medida sin necesidad de desmontar el conjunto completo.

Su ajuste es sencillo y son de fácil calibración mientras el instrumento está bajo presión y sin pérdida de líquido. Su tamaño varía de 3 a 12". La exactitud es del ± 0,2%, con una pérdida de carga de 0,3 bar y con un margen de caudal de 5 a 1.

Los *medidores ovales* (figura 4.48) disponen de dos ruedas ovales que engranan entre sí y tienen un movimiento de giro debido a la presión diferencial creada por el líquido. La acción del líquido va actuando alternativamente sobre cada una de las ruedas dando lugar a un giro suave de un par casi constante.

En la posición 1 el fluido ejerce una fuerza a derechas sobre el engranaje A, sin ejercer ninguna sobre el engranaje B, ya que este es perpendicular al flujo del fluido. En la posición 2, el fluido inicia una fuerza sobre el engranaje B. En la posición 3 sólo se ejerce una fuerza sobre el engranaje B. Finalmente, en la posición 4 se inicia una fuerza sobre el engranaje A para regresar a la posición 1.

La cámara de medida y las ruedas están mecanizadas con gran precisión para conseguir un deslizamiento mínimo entre las mismas, sin formación de bolsas o espacios muertos en la cámara de medida y barriendo completamente la misma en cada rotación. De este modo, la medida es prácticamente independiente de variaciones en la densidad y en la viscosidad del líquido. La exactitud es del ± 0,1% al ± 0,5% del caudal total. Los tamaños varían de 1/2 a 3".

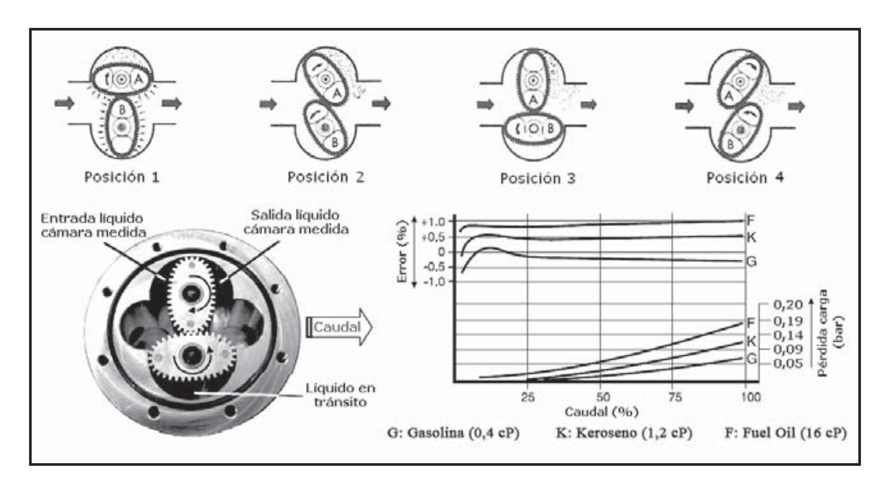


Figura 4.48 Medidor oval

4.1.6.5 Accesorios

Los medidores de desplazamiento positivo que se han descrito pueden tener acoplados varios tipos de transductores:

Transductor de impulsos por microrruptor eléctrico o neumático en el que el eje del medidor acciona un interruptor por medio de una leva. El interruptor está conectado a un contador electromecánico de baja velocidad.

Transductor de impulsos por sensor magnético que utiliza un rotor con unos pequeños imanes embebidos en él y un captador magnético situado en el exterior de la caja del rotor. Al girar el rotor se obtienen impulsos de ondas cuadradas, aptos para circuitos convertidores o integradores.

Generador tacométrico que genera una señal en c.c. de 0-100 mV proporcional al caudal. En su forma más sencilla consiste en un generador de c.c. con estator de imán permanente y rotor bobinado. La exactitud es bastante elevada, del orden del 0,01% para velocidades medias.

Combinados con estos transductores se encuentran otros tipos de accesorios:

- Convertidor de frecuencia-tensión.
- Convertidor de frecuencia-corriente.
- Totalizador electromecánico con *reset* manual.
- Totalizador electromecánico con *reset* externo, manual y automático.
- Totalizador electromecánico con predeterminador para procesos discontinuos.
- Totalizador neumático con programador para procesos discontinuos.
- Totalizador digital con *reset* externo, manual y automático y salida de control.
- Módulo de comunicaciones.

4.1.7 Remolino y vórtex

El *medidor de caudal por remolino* (figura 4.49) se basa en la determinación de la frecuencia del remolino producido por una hélice estática situada dentro de la tubería a cuyo través pasa el fluido

(líquido o gas). La frecuencia del remolino es proporcional a la velocidad del fluido, de acuerdo con la expresión conocida como número de Strouhal:

$$St = \frac{f \times d}{v}$$

Donde:

St = número de Strouhal

f = frecuencia del remolino

d = anchura del remolino

v = velocidad del fluido

El número de Strouhal es constante para números de Reynolds comprendidos entre 20.000 y 70.000.000 [$Re = (v \times D)/\eta$].

En estas condiciones, la frecuencia del remolino no se ve afectada por la viscosidad, la densidad, la temperatura o la presión del fluido. d es mantenido constante por el fabricante del medidor, con lo cual, y siendo:

$$Q = s \times v$$

con:

D = diámetro tubería

η = viscosidad cinemática

Q = caudal volumétrico del fluido

s = sección de la tubería

resulta:

$$Q = \frac{f \times d \times s}{St} = f \times K$$

siendo K el número de impulsos/litro.

Por lo tanto, el caudal volumétrico del fluido es proporcional a la frecuencia del remolino.

La detección de la frecuencia se logra con sensores de presión de cristales piezoeléctricos, o con una termistancia de muy baja inercia térmica que sigue los efectos de refrigeración del remolino generado en el gas, o bien mediante un condensador de capacidad variable, función de la deformación de un diafragma (placa), o bien mediante la aplicación de un haz de ultrasonidos perpendicularmente al remolino, midiendo el tiempo de tránsito del haz desde el transmisor al receptor.

Los transductores de remolino son adecuados en la medida de caudales de gases y de líquidos y su intervalo de medida entre el valor máximo y el mínimo es de 50 a 1. Deben instalarse en tubería recta con longitudes mínimas de 10 diámetros aguas arriba y de 5 diámetros aguas abajo.

El medidor debe instalarse perfectamente alineado con la tubería para asegurar la formación correcta de remolinos.

La exactitud del instrumento es del ± 1% al ± 1,5%.

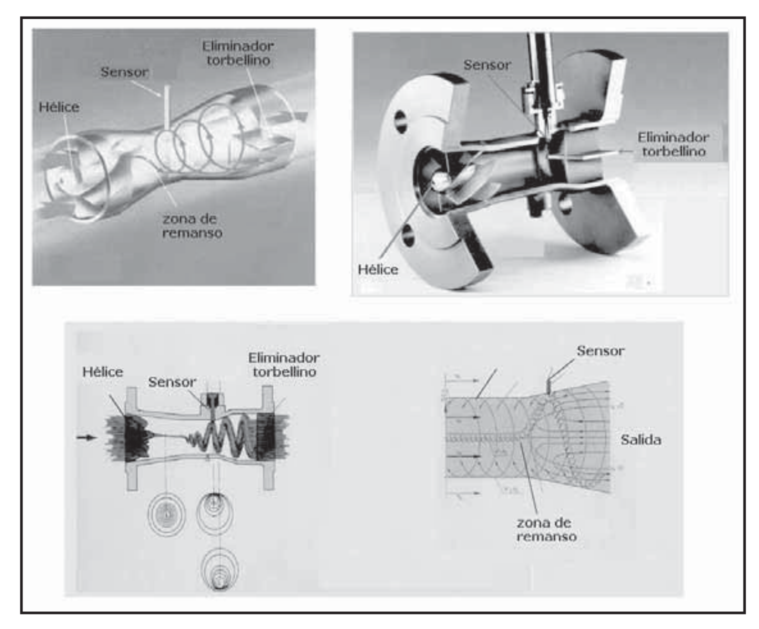


Figura 4.49 Medidor de caudal por remolino)

Los instrumentos de *vórtex* son parecidos a los de remolino, excepto que están basados en el efecto Von Karman, donde un cuerpo en forma de cono genera alternativamente vórtices (áreas de baja presión e inestabilidad) desfasados en 180°, cuya frecuencia es directamente proporcional a la velocidad y, por lo tanto, al caudal.

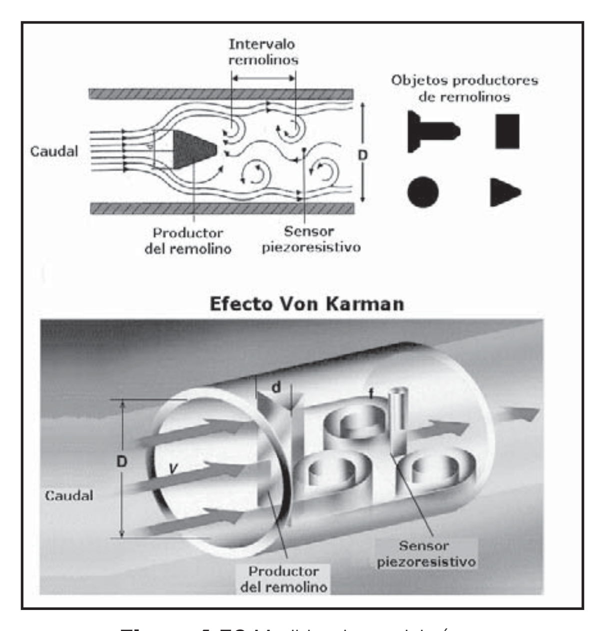


Figura 4.50 Medidor de caudal vórtex

Para asegurar una correcta medición, la tubería debe estar libre de obstrucciones cerca de la entrada. Generalmente, deben instalarse en tubería recta con longitudes mínimas de 15 diámetros aguas arriba y de 5 diámetros aguas abajo. El medidor debe instalarse perfectamente alineado con la tubería para asegurar la formación correcta de vórtices (áreas de baja presión e inestabilidad).

El vórtex debe instalarse de tal manera que el sensor esté siempre lleno de líquido. La exactitud es del ± 0,75% para líquidos y del ± 1% para gases.

4.2 Medidores de caudal masa

Si bien en la industria se utilizan normalmente medidores volumétricos de caudal, con el caudal determinado en las condiciones de servicio, en ocasiones interesa medir el caudal masa, sea inferencialmente por compensación de la presión, la temperatura o la densidad, o bien aprovechando características medibles de la masa con sistemas básicos de *medida directa*, los instrumentos térmicos, los de momento angular y los de Coriolis.

4.2.1 Medidores volumétricos compensados

Los medidores de caudal masa operando con medidores volumétricos con *compensación de densidad* se basan en transmitir la densidad (o su equivalente a partir de las medidas de la presión y temperatura del fluido), al medidor volumétrico y aplicar una simple operación de multiplicar para tener el caudal masa.

En los líquidos, como son incompresibles, la densidad varía por los cambios en la temperatura del fluido. Si se instala un transmisor de densidad que mida ésta en condiciones de servicio, bastará aplicar su salida directamente a la salida del transmisor de caudal para tener así el caudal corregido.

Siendo la fórmula simplificada del caudal de un fluido incompresible:

$$Q_p = \sqrt{K(p_a - p_c)\rho_0} \quad kg/h$$

con:

K = constante

p_a - p_c = presión diferencial creada por el elemento

ρ_0 = densidad del líquido en condiciones de servicio

o bien:

$$Q_p^2 = K(p_a - p_c) \times \rho_0$$

Así, pues, la señal de presión diferencial p_a -p_c captada por el transmisor correspondiente debe multiplicarse por la señal del transmisor de densidad, lo que se efectúa en el compensador.

El campo de medida del transmisor de densidad se fija de tal modo que el factor de corrección sea 1 cuando la densidad transmitida corresponde a la de cálculo.

Si el transmisor de densidad mide ésta en condiciones estándar (por ejemplo, a 15 °C) la señal de salida correspondiente debe corregirse, manual o automáticamente, para las variaciones de temperatura de la línea antes de introducirla en el compensador.

En los gases la fórmula simplificada toma la misma forma que la fórmula anterior para líquidos, ya que el factor de expansión ε puede incluirse en la constante K, luego:

$$Q_p^2 = K(p_a - p_c) \times \rho_0$$

con ρ_0 el peso específico del gas en las condiciones de servicio.

En los instrumentos electrónicos pueden utilizarse varios sistemas:

a) Una unidad compensadora (multiplicador-divisor) (figura 4.51) que trabaja con un transmisor de presión diferencial, un transmisor de presión absoluta *PP/I* de 4-20 miliamperios c.c. y un transmisor de temperatura *TC/I* de 4-20 mA c.c. y que compensa el caudal de gas para las variaciones de temperatura y presión. Puede realizar correcciones manuales de peso específico y compresibilidad. Su exactitud es del ± 0,2% de la escala.

b) Una unidad calculadora que compensa el caudal de gas para las variaciones de densidad del gas (figura 4.52) con correcciones manuales del peso específico. Sus características son semejantes a la unidad anterior. Su exactitud es del ± 0,15% de la escala.

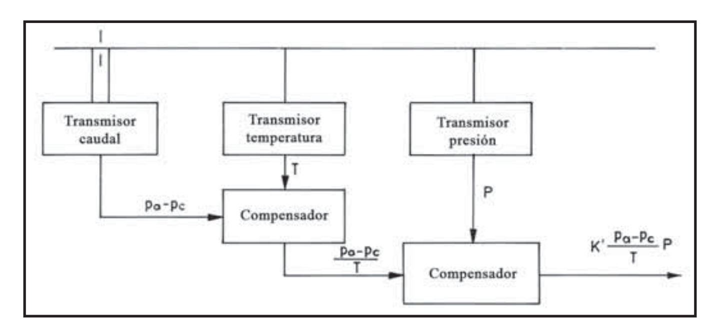


Figura 4.51 Unidad compensadora

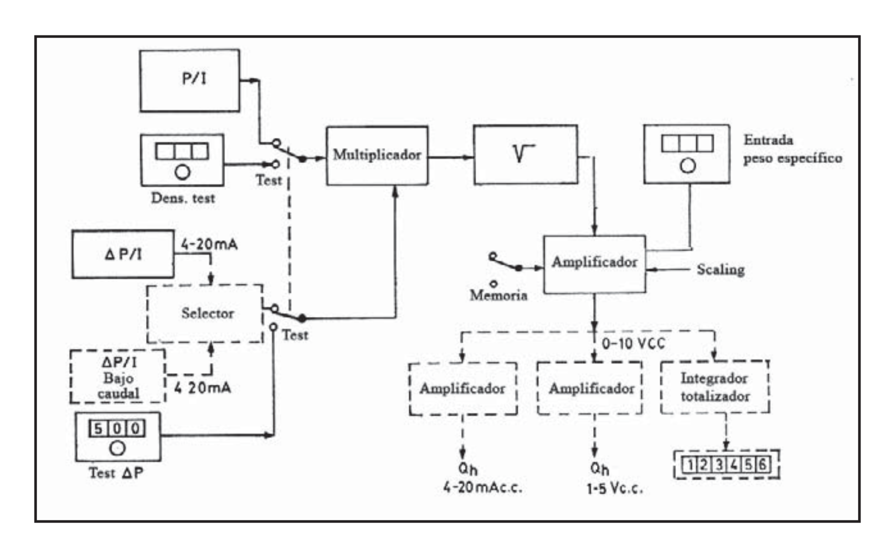


Figura 4.52 Compensación densidad

c) Compensación digital con transmisor multivariable (figura 4.53).

Los transmisores multivariables tienen incorporadas las compensaciones de presión y temperatura y, de este modo, reemplazan los tres transmisores clásicos de caudal volumétrico, presión y temperatura por un solo aparato.

Tienen la ventaja de proporcionar un cálculo dinámico del coeficiente de descarga, del factor de expansión del gas, de los efectos de las dilataciones térmicas que intervienen en la medida del caudal, de la presión y de la temperatura y, todo ello, dentro del mismo instrumento con sólo las conexiones adicionales de la sonda de temperatura (sonda de resistencia para mayor exactitud o termopar) y de la toma de presión en la tubería.

Permiten cambiar fácilmente las unidades de ingeniería, los campos de medida de la presión, temperatura y del propio caudal y facilitan un diagnóstico del estado del instrumento, así como de las comunicaciones (HART, FOUNDATION Fieldbus, Profibus PA, Modbus, etc.) con la planta y con el panel de control.

Tienen una exactitud en el caudal masa del ± 1% y una rangeabilidad de 8:1 en lugar de la clásica 3:1.

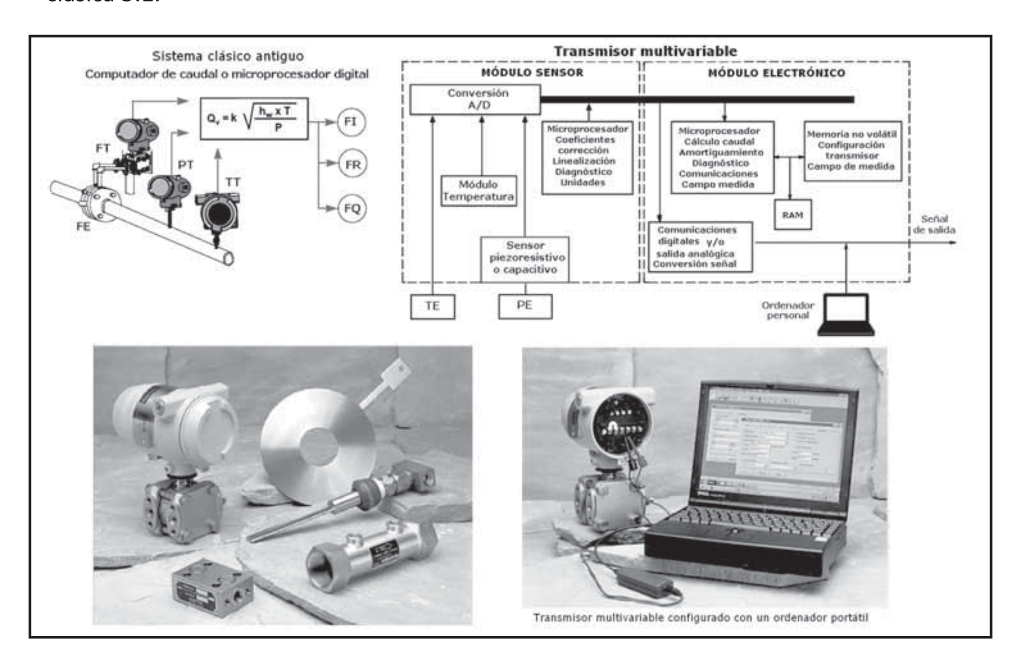


Figura 4.53 *Transmisor multivariable*

En cada uno de los sistemas descritos, la exactitud final de la medida depende de la influencia de los componentes empleados. Debe señalarse que con la placa-orificio colocada en tubería especial prefabricada puede obtenerse una exactitud en el caudal del ± 0,5%.

En la tabla 4.11 se señalan las exactitudes alcanzables con los conjuntos anteriores, debiendo señalar que no están incluidos los elementos primarios ni los instrumentos finales (receptores, integradores, controladores, etc.).

Instrumento	Exactitud (± %)	Compensación Presión y Temperatura		Compensación Densidad		Digital multivariable (± %)
	Electrónico (Neumático)	Electrónico (± %)	Neumático (± %)	Electrónico (± %)	Neumático (± %)	
Sonda resistencia	0,3	0,3	0,3			0,3
Placa orificio	0,5 - 1	1	1	1	1	1
DP/I (DP/P)	0,2 (0,5)	0,2	0,5	0,2	0,5	0,05
PP/I (PP/P)	0,1 (0,5)	0,5	0,5	-	-	0,05
TT/I (TT/P)	0,3 (0,5)	0,2	0,5	-	-	0,05
Densidad	0,5 (0,25)	-	-	0,3	1	-
Compensador	0,5 (0,2)	0,2	0,5	0,2	0,5	0,05
Caudal masa (Valor medio cuadrático)		1,21	1,45	1,08	1,58	1,05

Tabla 4.11 Sistemas de medida de caudal compensado

4.2.2 Medidores térmicos de caudal

Miden el caudal masa directamente y se basan en la elevación de temperatura del fluido en su paso por un cuerpo caliente. El primer instrumento de esta clase fue proyectado por Thomas en 1911 para medir el caudal masa de gas en una tobera. Por este motivo, estos aparatos reciben también el nombre de medidores de caudal Thomas.

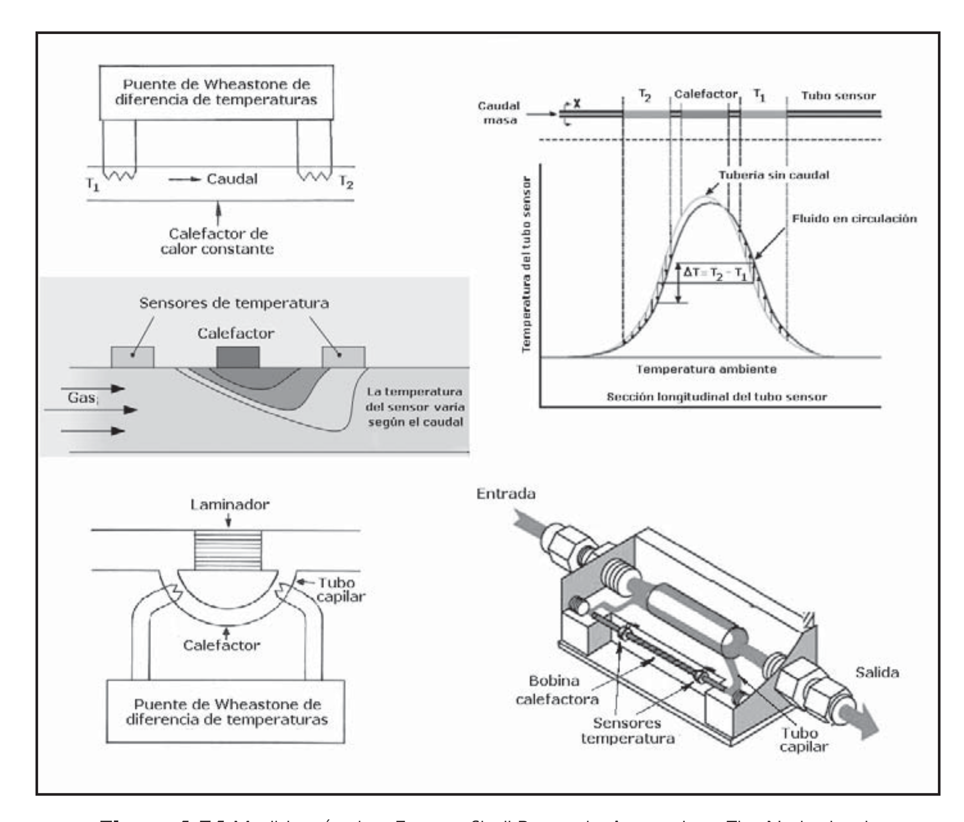


Figura 4.54 Medidor térmico. Fuente: *Shell Research, Amsterdam, The Netherlands*

Consisten en una fuente eléctrica de alimentación de precisión que proporciona un calor constante al punto medio del tubo por el que circula el fluido. En puntos equidistantes de la fuente de calor se encuentran sondas de resistencia para medir la temperatura.

Cuando el fluido está en reposo, la temperatura es idéntica en las dos sondas. Cuando el fluido circula, transporta una cantidad de calor hacia la segunda sonda y se presenta una diferencia de temperaturas que va aumentado progresivamente entre las dos sondas a medida que aumenta el caudal. Esta diferencia es proporcional a la masa que circula a través del tubo, de acuerdo con la ecuación:

$$Q = mc_e (t_2 - t_1)$$

en la que:

Q = calor transferido

m = masa del fluido

c_e = calor específico

t_1 = temperatura anterior

t_2 = temperatura posterior

El sistema está conectado a un puente de Wheatstone que determina la diferencia de temperaturas y la amplifica con una señal de salida de 0-5 V c.c. en 1000 ohmios de impedancia. Esta señal puede ser utilizada en registradores, indicadores digitales y controladores y admite comunicaciones digitales (HART, FOUNDATION Fieldbus, Profibus PA, Modbus, etc.) con la planta y con el panel de control.

La exactitud del medidor térmico de caudal es del ± 1% al ± 2% de toda la escala, la rangeabilidad es de 100:1, la repetibilidad del ± 0,2% de la escala y la constante de tiempo de 0,5 a 3 s. Es recomendable la calibración del instrumento en las condiciones más cercanas posibles a su utilización final.

La medida es apta para bajos caudales de gas que van según los modelos de 0-10 cm^3/minuto.

Para aumentar el caudal medible se deriva el fluido con un capilar y se intercala un laminador que garantiza el mismo flujo laminar que en el capilar. Como se conoce la relación de secciones entre el laminador y el capilar, midiendo el caudal en el sensor se obtiene la medida del caudal total. De este modo, los caudales medibles llegan a 15 l/min en gases y a 20 kg/h en líquidos.

No hay obstrucciones al paso de caudal por ser el tubo de medida recto y las paredes internas lisas. El instrumento puede medir caudales bajos y es adecuado para gases tales como aire, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, helio, amoníaco, argón, monóxido de carbono, anhídrido carbónico, ácido clorhídrico, etano, etileno, metano, fosfórico y otros. También puede emplearse en líquidos, pero con caudales muy bajos.

Sus desventajas son que el gas debe estar seco y libre de partículas, tiene una respuesta lenta y debe ser calibrado para un gas o una mezcla de gases determinada.

4.2.3 Anemómetro de hilo caliente

Consiste en un conductor de hilo delgado (0,004 mm de diámetro y 1,27 mm de largo) o bien una película delgada, soportado en sus extremos y calentado por una corriente eléctrica. El hilo suele ser de tungsteno, material rígido de alto coeficiente de temperatura de resistencia. El sensor está dispuesto en una tubería por la que circula el gas, con lo que se enfría y la tasa de enfriamiento es

proporcional al caudal masa. Se utilizan para velocidades de 15 a 3.600 m/minuto y en fluidos con turbulencias.

El circuito puede ser de corriente constante o de temperatura constante.

En el *circuito de corriente constante* (o potencia constante) la corriente a través del hilo caliente se mantiene constante y la temperatura de equilibrio alcanzada, por el hilo caliente expuesto al flujo del fluido, es simplemente proporcional al caudal. Tienen el inconveniente de que el cero no es estable, la respuesta en velocidad y temperatura es lenta y la compensación de temperatura está limitada.

El calor o potencia generados en el hilo $I^2 \times R$ se mantiene constante y la temperatura de equilibrio alcanzada con el calor perdido por el paso del fluido, es función de la velocidad del fluido.

En equilibrio se verifica la siguiente ecuación:

$$I^2 \times R_{hilo} = h \times A \times (T_{hilo} - T_{fluido})$$

siendo:

I = intensidad de la corriente

R_{hilo} = resistencia del hilo caliente

T_{hilo} = temperatura del hilo caliente

T_{fluido} = temperatura del fluido

h = coeficiente de transferencia de calor de la película

A = área de transferencia de calor

En este tipo de corriente constante, el valor de la corriente es elevado y si la velocidad del fluido disminuye bruscamente, se reduce la pérdida por convección y el hilo caliente puede quemarse por exceso de calor.

En el *circuito de temperatura constante* un circuito electrónico de retroalimentación ajusta la corriente que circula a través del hilo caliente para mantener una temperatura constante del mismo, bajo todas las condiciones de caudal del fluido. La pequeña inercia del hilo combinada con la alta amplificación del amplificador permite determinar fluctuaciones en la velocidad del fluido de varios cientos de Hz.

El hilo se conecta a un circuito de puente de Wheastone. Cuando no hay caudal, el circuito está equilibrado y, cuando el caudal varía, cambia la resistencia del hilo caliente y el puente se desequilibra. La tensión de desequilibrio se amplifica y alimenta el puente, con lo que la corriente del puente necesaria para equilibrarlo indica la velocidad del flujo del fluido.

Se asume que se alcanza un equilibrio entre el calor generado por la corriente en el hilo y la perdida de calor por convección del entorno. Si la velocidad cambia el coeficiente de transferencia de calor por convección, varía dando lugar a un nuevo equilibrio entre la temperatura del hilo y el entorno. Las ecuaciones de transferencia de calor del hilo caliente incluyen las propiedades del fluido (conductividad calorífica, viscosidad, densidad, concentración, etc.) así como la temperatura del hilo, la geometría del sensor y la dirección del flujo respecto al sensor.

Se verifica la ecuación:

$$W = Q + \frac{dQ_i}{dt}$$

en la que:

W = potencia por efecto Joule = $I^2 \times R_w$

Q = calor transferido al entorno

$Q_i = C_w T_w$ = energía térmica almacenada en el hilo

C_w = calor específico del hilo

T_w = temperatura del hilo

La tensión de salida del circuito tiene la forma:

$$E^2 (v) = a + b \times v^{\theta}$$

En la que a, b, θ son constantes de calibración del anemómetro.

Esta ecuación no tiene una relación lineal con la velocidad y es de naturaleza exponencial. De aquí que precisa la calibración del anemómetro antes de su utilización. El sistema tiene una sensibilidad casi constante dentro del campo amplio de velocidades, de modo que cubre velocidades desde unos pocos cm/s hasta velocidades superiores a la del sonido. Los sensores pueden ser de varios tipos: hilos miniatura (buena respuesta de alta frecuencia), hilos de lamina de oro, película delgada de níquel o sensores de fibra. La exactitud es del ± 1%.

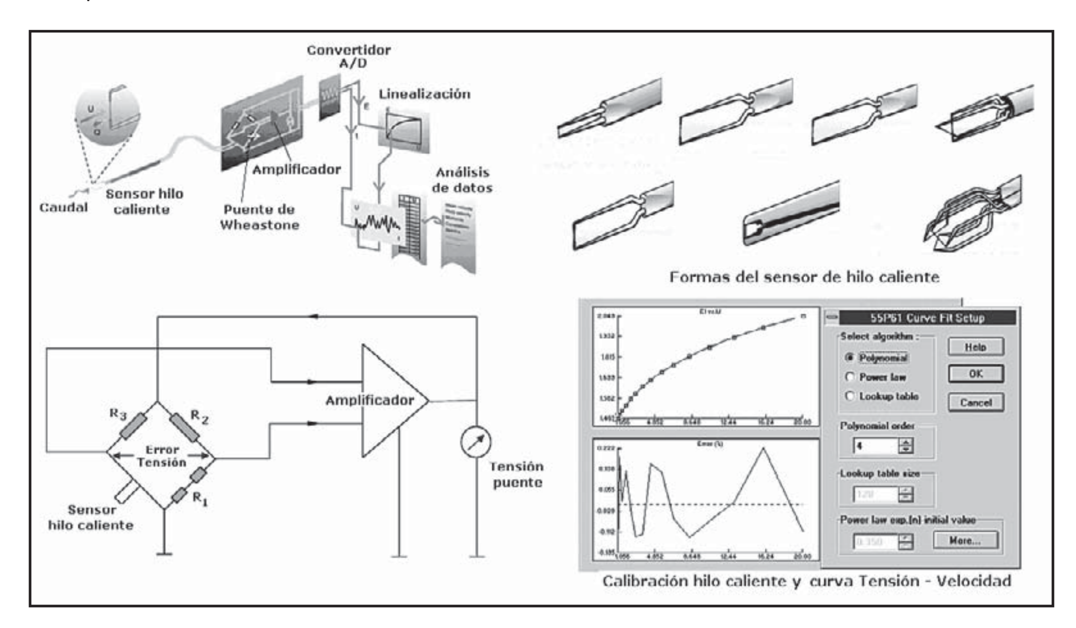


Figura 4.55 *Anemómetro de hilo caliente de temperatura constante*

Los anemómetros de hilo caliente se caracterizan por una buena respuesta de alta frecuencia, un bajo ruido electrónico y son inmunes a la rotura del sensor cuando el gas deja de circular súbitamente. Tienen las desventajas de su inestabilidad, deriva y alto ruido que enmascaran la medida de fluidos de baja velocidad.

Se utilizan para medir perfiles de velocidades y en investigación de turbulencias. Su fragilidad y su susceptibilidad a los errores causados por la suciedad no los hacen adecuados para el entorno

industrial. Pero en entornos limpios y en medidas esporádicas de caudal son perfectamente utilizables para medir la velocidad y lógicamente el caudal (velocidad × sección tubería).

4.2.4 Medidor de Coriolis

El *medidor de Coriolis* se basa en el teorema de Coriolis, matemático francés (1795-1843) que observó que un objeto de masa m que se desplaza con una velocidad lineal V a través de una superficie giratoria, que gira con velocidad angular constante w, experimenta una velocidad tangencial (velocidad angular × radio de giro) tanto mayor cuanto mayor es su alejamiento del centro. Si el móvil se desplaza del centro hacia la periferia experimentará un aumento gradual de su velocidad tangencial, lo cual indica que se le está aplicando una aceleración y, por lo tanto, una fuerza sobre su masa. Como el radio de giro va aumentando gradualmente, la velocidad tangencial también varía, con lo que se concluye que una variación de velocidad comporta una aceleración que, a su vez, es debida a una fuerza que actúa sobre la bola. Estas son, respectivamente, la aceleración y la fuerza de Coriolis. La fuerza de Coriolis es, pues, una manifestación de la inercia del objeto según la primera ley del movimiento de Newton. Además, también es válida la segunda ley de Newton (Fuerza = Masa × Aceleración), lo que permite, al hacer circular el fluido por un tubo especial provisto de un mecanismo de vibración y de sensores de la fuerza desarrollada, determinar el caudal masa del fluido.

Puede entenderse el teorema de Coriolis, situando por ejemplo, una bola de acero en el centro de un disco giratorio lleno de grasa, que actúa como freno, y al hacerlo girar, la bola describe una línea curva hasta salir del disco. Durante su recorrido tiene una velocidad tangencial igual a la velocidad angular del disco multiplicada por la distancia al centro de giro. Esta velocidad tangencial va aumentando a medida que la bola se aleja del centro del disco, lo que, tal como se ha dicho, evidencia la existencia de una aceleración y, por lo tanto, de una fuerza.

Este fenómeno es el causante de que el remolino que se forma en el fondo de un depósito al vaciarlo, gira a derechas en el hemisferio Norte y a izquierdas en el hemisferio Sur.

Asimismo, todos los vientos de la circulación general que soplan desde el Norte al Sur en el hemisferio Norte son desviados, debido a la rotación de la Tierra de Oeste a Este, gracias a la fuerza de Coriolis sobre las masas de aire de los cinturones de presión, constituyendo en el cinturón 30° N - 60° N, los vientos predominantes del Oeste y en el cinturón O° N - 30° N, los vientos alisios.

Por otro lado, el célebre péndulo de Foucault también demuestra el fenómeno. Situado en cualquier punto de la Tierra gira con una velocidad directamente proporcional al seno de la latitud del lugar y así el tiempo de una rotación es inversamente proporcional al valor de dicho seno. De este modo un péndulo situado a 45° gira una vez cada 1,4 días (seno 45° = 0,7 y 1/0,7 = 1,4) y a 30° (seno 30° = 0,5 y 1/0,5 = 2) cada 2 días.

Asimismo, la torsión de una manguera de agua al dejar libre su extremo, es otra evidencia de la fuerza de Coriolis.

La generación de la fuerza de Coriolis puede producirse básicamente de dos formas:

a) *Por inversión de las velocidades lineales del fluido mediante la desviación de un bucle en forma de omega (Ω) en estado de vibración controlada*

   La vibración del tubo es perpendicular al sentido de desplazamiento del fluido, tiene una amplitud de unos 2 mm y una frecuencia de 80 ciclos/minuto próxima a la frecuencia natural del

tubo. Cuando en la mitad de un ciclo el tubo se mueve hacia arriba, el líquido que entra es forzado a subir y, debido a su inercia, empuja el tubo hacia abajo con una fuerza (Coriolis) en cada unidad de masa que depende del radio de giro. Al pasar al tubo de salida, la velocidad del movimiento vertical se reduce, ya que al progresar dentro de la tubería va disminuyendo el radio de giro, con lo que, debido a su inercia, crea una fuerza hacia arriba.

De este modo, se genera un par cuyo sentido va variando de acuerdo con la vibración y con el ángulo de torsión del tubo, y que es directamente proporcional a la masa instantánea de fluido circulante.

$$\overline{F} = 2m\overline{w} \times \overline{V}$$

siendo:

$\overline{F}$ = fuerza de Coriolis

m = masa del fluido contenida en el tubo recto de longitud L

$\overline{w}$ = velocidad angular alrededor del eje del tubo en Ω

$\overline{V}$ = velocidad lineal del fluido

El par creado respecto al eje *R-R* del tubo es:

$$M = 2 \times F \times r = 4 \times w \times r \times m \times V = 4 \times w \times r \times Q$$

Si K_s es la constante de elasticidad del tubo y θ el ángulo de torsión del tubo, la fuerza de torsión del tubo que equivale al par creado respecto al eje del tubo es:

$$T = K_s \times \theta$$

Luego, como $M = T$ resulta finalmente el caudal másico:

$$Q = \frac{K_s \times \theta}{4wr}$$

Así pues, el ángulo de torsión del tubo medido con dos sensores, situados por encima y por debajo en la línea del eje, determinará el caudal.

La constante K_s de elasticidad del tubo tiene por expresión:

$$K_s = S_k\ (20\ °C) \times (1 + S_{kt}\ x\ (t - 20\ °C))$$

siendo:

S_{kt} = coeficiente de corrección de temperatura del material

$S_k\ (20\ °C)$ = constante del sensor a 20 °C

t = temperatura

Los sensores magnéticos de posición están situados en el centro del tubo y combinan dos intervalos de tiempo, uno del movimiento hacia abajo del tubo y el otro del movimiento hacia arriba. De este modo, la diferencia de las ondas se traduce en impulsos que alimentan un integrador lineal. Cuando hay caudal, el integrador carga un circuito electrónico analógico o digital. Las opciones de salida incluyen señales de frecuencia, analógica de 4-20 mA c.c., y digital por protocolo HART, Modbus, Fieldbus o Profibus.

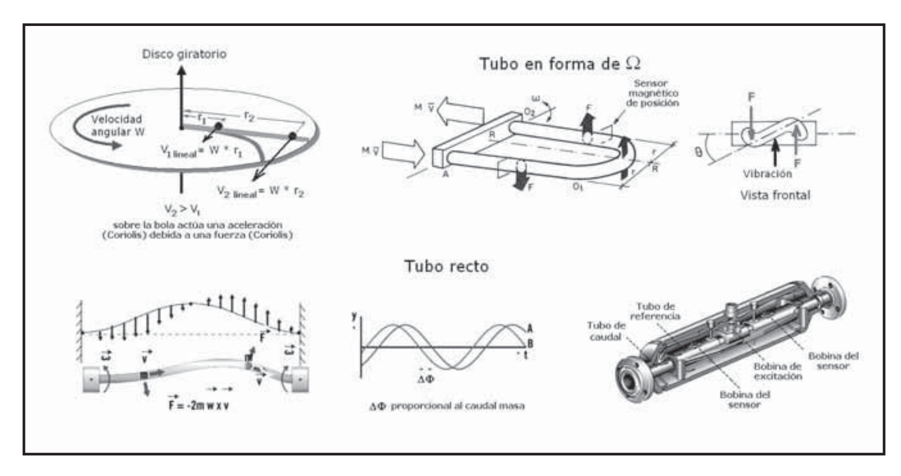


Figura 4.56 Medidor de Coriolis

La diferencia en tiempo (Δt) de las señales de los sensores de posición está relacionada con θ y con la velocidad (V_i) del tubo en su punto medio, según:

$$tg\theta = \frac{V_i}{2r} \times \Delta t$$

y como θ es pequeño resulta:

$$\theta = \frac{Lw}{2r} \times \Delta t$$

y combinando las expresiones de Q y θ resulta:

$$Q = \frac{K_s \times L}{8r^2} \Delta t$$

lo que indica que el caudal sólo es proporcional al intervalo de tiempo y a las constantes del tubo. Es independiente de w (frecuencia de vibración del tubo).

b) *Por inversión de las velocidades angulares del fluido mediante un tubo recto*

El tubo está fijado en ambos extremos y se hace vibrar en el centro, de tal modo que el eje de rotación del lado de la entrada es opuesto al eje de rotación a la salida, creándose así dos fuerzas de Coriolis opuestas. Por ejemplo, si el tubo asciende en la entrada, el líquido que entra es forzado a subir y, debido a su inercia, empuja el tubo hacia abajo. Al pasar del centro es forzado a reducir su movimiento vertical con lo que, debido a su inercia, crea una fuerza hacia arriba.

$$\vec{F} = -2 \times m \times w \times v$$

con:

m = masa del fluido

w = velocidad angular del movimiento de torsión

v = velocidad lineal del fluido

Se observa que la velocidad lineal del fluido en los puntos extremos es la misma, pero debido a la vibración a que se somete el tubo, la velocidad angular en A es contraria a la de B. Esta diferencia de fase es la que miden los sensores y es proporcional al caudal másico. La ventaja principal del tubo recto con relación al tubo en forma de omega (Ω) es que su pérdida de carga es muy baja y no afecta a los fluidos muy viscosos o abrasivos o que contengan una cantidad importante de sólidos en suspensión, que obturarían el tubo.

Cuando en la mitad de un ciclo el tubo se mueve hacia arriba, el líquido que entra es forzado a subir y, debido a su inercia, empuja el tubo hacia abajo con una fuerza (Coriolis) en cada unidad de masa que depende del radio de giro. Al pasar al tubo de salida, la velocidad del movimiento vertical se reduce, ya que al progresar dentro de la tubería va disminuyendo el radio de giro, con lo que, debido a su inercia, crea una fuerza hacia arriba. De este modo, se genera un par cuyo sentido va variando de acuerdo con la vibración y con el ángulo de torsión del tubo, y que es directamente proporcional a la masa instantánea de fluido circulante.

La medida es independiente de la temperatura, presión y densidad del fluido. La selección del material del tubo es importante puesto que debe soportar la fatiga mecánica debida a la vibración a su frecuencia natural, la corrosión y erosión del fluido.

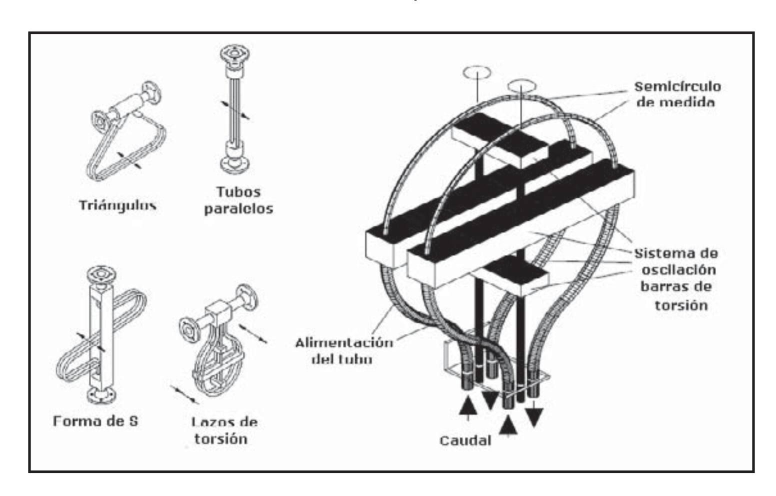


Figura 4.57 *Formas de tubos de Coriolis. Fuente: ISA Expo 2004 - Rheonik*

La exactitud es del orden del ± 0,3%.

El modelo de doble (Ω) dispone de varillas de torsión y barras transversales. La medida activa se realiza en el semicírculo superior donde están los sensores. El sistema de oscilación consiste en dos barras de torsión y dos barras transversales. El sistema de alimentación está en la parte inferior y sólo es afectado por un bajo momento de torsión. Puede medir hasta 1.500 m^3/h a presiones hasta 900 bar y temperaturas entre -250 °C y 400 °C.

Otros tipos de tubos empleados tienen la forma de S, Z, triángulos y lazos de torsión.

Todos estos instrumentos de caudal pueden disponer de unidades de transmisión inteligente que les permiten su fácil calibración, el cambio rápido del campo de medida y la lectura de la variable en cualquier punto de la instalación donde se hayan previsto tomas, por ejemplo, en el transmisor y en el receptor.

4.3 Comparación de características de los medidores de caudal

En la tabla 4.12 se muestran las características resumidas de los instrumentos medidores de caudal.

Tipo	Rangeabilidad	Exactitud (%)	Escala	Presión máx., bar	Temperatura máx., ºC	Pérdida de carga	Servicio	Materiales	Coste relativo	Ventajas	Desventajas
Placa	3:1	2% - 4%	cuadrática	400	500	Media	Líquido/vapor /gas	Metales/ Plásticos	Bajo	Simple, económica	Posible obturación, desgaste
Tobera	3:1	2%	cuadrática	400	500	Media	Líquido/vapor /gas	Metales/ Plásticos	Alto	Simple, exactitud	Posible obturación, coste alto
Tubo Venturi	3:1	1%	cuadrática	400	500	Baja	Líquido/vapor /gas	Metales/ Plásticos	Alto	Exactitud, poca ΔP	Posible obturación, coste muy alto
Tubo Pitot	3:1	1%-3%	cuadrática	400	500	Muy baja	Líquido/vapor /gas	Metales/ Plásticos	Bajo	Simple, económico	Poca exactitud, posible obturación
Tubo Annubar	3:1	0,5% - 1,5%	cuadrática	400	500	Muy baja	Líquido/vapor /gas	Metales/ Plásticos	Bajo	Mayor exactitud, poca ΔP	Posible obturación
Rotámetro	10:1	1% - 2%	lineal	400	250	Media	Líquido/vapor /gas	Metales/ Plásticos/ Vidrio	Bajo	Simple, económico, mayor exactitud	Posible obturación
Vertedero	10:1	1% - 2%	especial	Atmosférica	60	Baja a media	Líquidos	Metales	Alto	Simple, bajo coste	Posible obturación
Turbina	20:1	0,25%	lineal	200	250	Alta	Líquido/gas	Metales	Alto	Exactitud, margen amplio	Desgaste, daños por caudal excesivo
Ultrasónico	20:1	2%	lineal	100	250	Ninguna	Líquido/gas	Metales/Plásticos	Alto	Cualquier líquido, baja ΔP, bajo mantenimiento	Coste inicial alto, sensible a variaciones densidad
Placa de impacto	10:1	1%	cuadrática	100	400	Media	Líquidos	Metales	Medio	Fluidos viscosos	Poca capacidad
Magnético	40:1	0,5% - 1%	lineal	20 - 200	150	Ninguna	Líquidos	Metales/ Teflón/Fibra de vidrio	Alto	Exactitud, baja ΔP	Líquidos conductores, electrodos pueden recubrirse
Disco basculante	10:1	1% - 5%	lineal	100	80	Alta	Líquido/gas	Metales/ Plásticos	Bajo	Económico	Desgaste, líquidos limpios, uso limitado en grandes tuberías
Pistón oscilante	10:1	0,50%	lineal	10 - 150	120	Alta	Líquido/gas	Metales	Medio	Exactitud, campo amplio, económico	Desgaste, líquidos limpios, uso limitado en grandes tuberías
Pistón alternativo	10:1	0,50%	lineal	25	100	Alta	Líquido/gas	Metales	Medio	Exactitud, campo amplio	Desgaste, líquidos limpios, uso limitado en grandes tuberías
Cicloidal	10:1	0,50%	lineal	100	150	Alta	Líquido/gas	Metales	Medio	Exactitud, campo amplio, baja ΔP	Desgaste, líquidos limpios, uso limitado en grandes tuberías
Birrotor	10:1	0,50%	lineal	100	200	Alta	Líquido/gas	Metales	Medio	Exactitud, campo amplio, reversible	Desgaste, líquidos limpios, uso limitado en grandes tuberías
Oval	10:1	0,50%	lineal	100	180	Alta	Líquido/gas	Metales	Medio	Exactitud, campo amplio, reversible	Desgaste, líquidos limpios, uso limitado en grandes tuberías
Torbellino	10:1	1%	lineal	50	100	Media	Líquido/vapor /gas	Metales/ Plásticos	Alto	Margen amplio, poca ΔP, fácil instalación	Caro, vibración afecta exactitud
Vórtex	10:1	1%	lineal	50	100	Media	Líquido/vapor /gas	Metales/ Plásticos	Alto	Margen amplio, poca ΔP, fácil instalación	Caro, vibración afecta exactitud
Térmico	10:1	1%	lineal	100	65	Ninguna	Gas	Metales/ Plásticos	Alto	Económico, fluidos de baja densidad	Poca exactitud, limpieza periódica
Hilo caliente			especial	100	65	Baja	Gas	Metales/ Plásticos	Medio	Medida caudales gases turbulentos	Investigación, usos industriales limpios
Coriolis	10:1	0,50%	lineal	900	-250 ºC a 400 ºC	Baja	Líquido/vapor /gas	Metales/ Plásticos	Alto	Exactitud elevada, caudal masa verdadero	Sensible a vibraciones, coste alto

Tabla 4.12 Características resumidas de los instrumentos medidores de caudal



Capítulo 5
Medición de nivel

En la industria, la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

La utilización de instrumentos electrónicos con microprocesador en la medida de otras variables, tales como la presión y la temperatura, permite añadir "inteligencia" en la medida del nivel, y obtener exactitudes en la lectura altas, del orden del ± 0,2%, en el inventario de materias primas o finales o en transformación en los tanques del proceso.

El transmisor de nivel "inteligente" hace posible la interpretación del nivel real (puede eliminar o compensar la influencia de la espuma en flotación del tanque, en la lectura), la eliminación de las falsas alarmas (tanques con olas en la superficie debido al agitador de paletas en movimiento), y la fácil calibración del aparato en cualquier punto de la línea de transmisión.

Los instrumentos de nivel pueden dividirse en medidores de nivel de líquidos y de sólidos, que son dos mediciones claramente diferenciadas.

5.1 Medidores de nivel de líquidos

Los medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo, bien directamente la altura de líquido sobre una línea de referencia, bien la presión hidrostática, bien el desplazamiento producido en un flotador por el propio líquido contenido en el tanque del proceso, bien aprovechando características eléctricas del líquido o bien utilizando otros fenómenos.

Los primeros instrumentos de medida directa se dividen en: sonda, cinta y plomada, nivel de cristal, nivel de flotador, magnético, palpador servooperado y magnetoestrictivo.

Los aparatos que miden el nivel aprovechando la presión hidrostática son:

- Medidor manométrico
- Medidor de tipo burbujeo
- Medidor de presión diferencial de diafragma

El empuje producido por el propio líquido lo aprovecha el medidor de desplazamiento.

Los instrumentos que utilizan las características eléctricas del líquido son:

- Medidor resistivo/conductivo
- Medidor capacitivo
- Medidor ultrasónico
- Medidor de radar o microondas
- Medidor de radiación
- Medidor de láser

Y los que se basan en otros fenómenos:

- Medidor óptico
- Vibratorio
- Detector de nivel térmico o de dispersión térmica

5.1.1 Instrumentos de medida directa

El *medidor de sonda* consiste en una varilla o regla graduada de la longitud conveniente para introducirla dentro del depósito. La determinación del nivel se efectúa por lectura directa de la longitud mojada por el líquido. En el momento de la lectura el tanque debe estar abierto a presión atmosférica. Se utiliza, generalmente, en tanques de fuel-oil o gasolina.

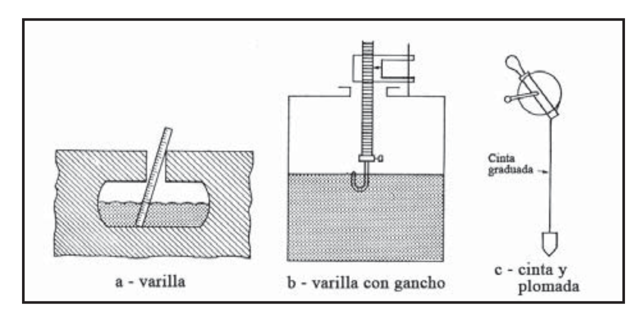


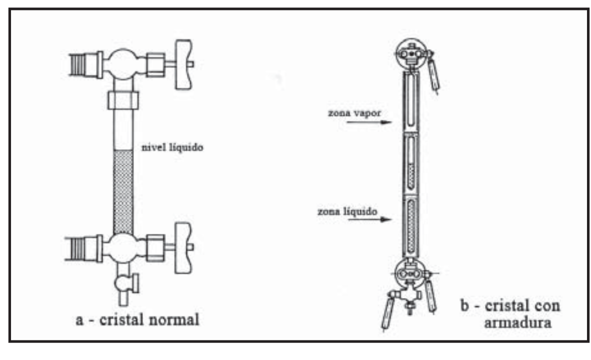
Figura 5.1 Medidor de sonda

Otro medidor consiste en una varilla graduada con un gancho que se sumerge en el seno del líquido y se levanta después hasta que el gancho rompe la superficie del líquido. La distancia desde esta superficie hasta la parte superior del tanque representa indirectamente el nivel. Se emplea en tanques de agua a presión atmosférica. Otro sistema parecido es el medidor de cinta graduada y plomada, representado en la figura 5.1c, que se emplea cuando es difícil que la regla graduada tenga acceso al fondo del tanque. Se lanza la cinta con la plomada hasta que toca la superficie del líquido o hasta que toca el fondo del tanque. La marca del líquido en la cinta indica el nivel.

El *nivel de cristal* consiste en un tubo de vidrio con sus extremos conectados a bloques metálicos y cerrados por prensaestopas que están unidos al tanque, generalmente, mediante tres válvulas, dos de cierre de seguridad en los extremos del tubo para impedir el escape del líquido, en caso de rotura del cristal, y una de purga (figura 5.2).

El nivel de cristal normal (figura 5.2a) se emplea para presiones de hasta 7 bar. A presiones más elevadas el cristal es grueso, de sección rectangular y está protegido por una armadura metálica (figura 5.2b). En otro tipo de medidor de nivel la lectura del nivel se efectúa con un cristal a reflexión o bien por transparencia. En el primer caso, que puede verse en la figura 5.2c, el vidrio en contacto con el líquido está provisto de ranuras longitudinales que actúan como prismas de reflexión indicando la zona de líquido con un color oscuro casi negro y la zona superior en contacto con el vapor de color claro.

En la lectura por transparencia (figura 5.2d) empleada para apreciar el color, características o interfase del líquido, éste está contenido entre dos placas de vidrio planas y paralelas que permiten ver directamente el nivel, mejorándose la apreciación visual al acoplar una lámpara de iluminación al sistema.



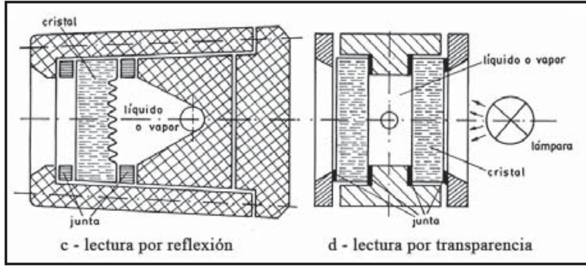


Figura 5.2 Nivel de cristal

Para mayor seguridad, las válvulas de cierre incorporan una pequeña bola que actúa como válvula de retención en caso de rotura del vidrio.

Los niveles de vidrio son susceptibles de ensuciarse por las características del líquido que miden, impidiendo que el nivel pueda apreciarse claramente. Entre los líquidos que presentan este inconveniente figuran el caramelo y los líquidos pegajosos.

El nivel de vidrio sólo permite una indicación local, si bien pueden emplearse espejos para lectura a distancias limitadas o bien utilizar cámaras de televisión para mayores distancias de transmisión.

Su ventaja principal es la gran seguridad que ofrece en la lectura del nivel del líquido pudiendo controlar con ellos la lectura de los otros tipos de aparatos de nivel.

Se utilizan niveles de vidrio con camisa para calefacción o refrigeración en el caso de productos muy viscosos o volátiles o cuando las temperaturas de proceso son inferiores a 0 °C.

Los *instrumentos de flotador* (figura 5.3) consisten en un flotador situado en el seno del líquido y conectado al exterior del tanque indicando directamente el nivel. La conexión puede ser directa, magnética o hidráulica.

El *flotador conectado directamente* está unido por un cable que desliza en un juego de poleas a un índice exterior que señala sobre una escala graduada. Es el modelo más antiguo y el más utilizado en tanques de gran capacidad, tales como los de fuel-oil y gas-oil. Tiene el inconveniente de que las partes móviles están expuestas al fluido y pueden romperse, y de que el tanque no puede estar sometido a presión. Además, el flotador debe mantenerse limpio. La escala está graduada de forma inversa, es decir, cuando el tanque está lleno, el índice exterior está en la parte inferior de la escala y señala el 100% del nivel, y cuando está vacío señala el 0% con el índice situado en la parte superior.

El *indicador de nivel magnético* se basa en el seguimiento magnético de un flotador que desliza por un tubo guía y que contiene un potente electroimán. Hay dos modelos básicos:

1. Flotador tubo guía situados verticalmente en el interior del tanque. Dentro del tubo, una pieza magnética sigue al flotador en su movimiento y mediante un cable y un juego de poleas arrastra el índice de un instrumento situado en la parte superior del tanque. El instrumento puede, además, incorporar un transmisor neumático, electrónico o digital. Su repetibilidad es de ± 0,01 o 0,4 mm.
2. Flotador que desliza a lo largo de un tubo guía sellado acoplado externamente al tanque. El flotador contiene un potente imán y, en la parte externa, hay un tubo de vidrio no poroso herméticamente sellado, dotado de un indicador fluorescente o de pequeñas cintas magnéticas que siguen el campo magnético del flotador.

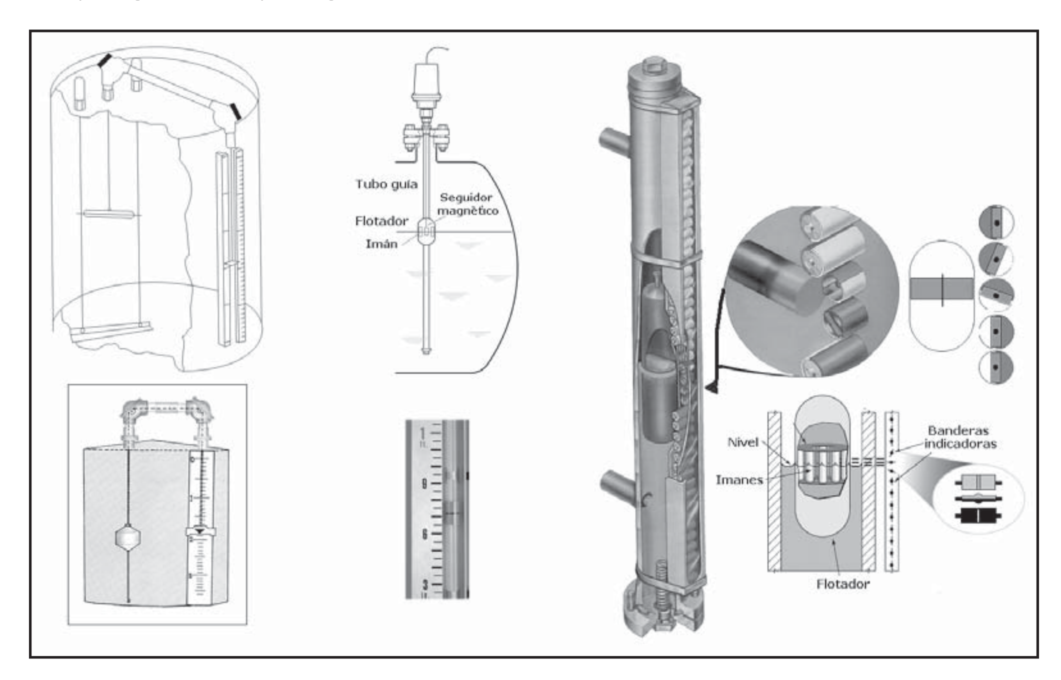


Figura 5.3 Instrumentos de nivel de flotador (directo y magnético). Fuente: Sigma y Cesare Bonetti

A medida que el nivel sube o baja las cintas giran y, como tienen colores distintos en su anverso y reverso, visualizan directamente el nivel del tanque. El instrumento puede tener interruptores de alarma y transmisor incorporados. Se utilizan en sustitución de los niveles de vidrio cuando se dan algunas de las siguientes condiciones:

a) La presión es superior a 25 bar.
b) Existe la probabilidad de rotura del vidrio por las condiciones de los líquidos (caso de altas presiones, muy bajas temperaturas, etc.).
c) Es preciso evitar el escape de gases tóxicos, líquidos inflamables, etc.
d) Los depósitos o tanques a medir están enterrados, o bien cuando es necesario ver el nivel a distancia.
e) Los líquidos son sucios o viscosos (asfaltos, residuos de vacío, crudos, etc.).

En tanques pequeños, el flotador puede adaptarse para actuar magnéticamente sobre un transmisor neumático, electrónico o digital dispuesto en el exterior del tanque, permitiendo así un control del nivel; una aplicación típica la constituye el control de nivel de una caldera de pequeña capacidad de producción de vapor.

Hay que señalar que en estos instrumentos, el flotador puede tener formas muy variadas y estar formado por materiales muy diversos según sea el tipo de fluido.

Estos instrumentos son adecuados en la medida de niveles en tanques abiertos y cerrados a presión o al vacío, y son independientes del peso específico del líquido. Por otro lado, el flotador puede agarrotarse en el tubo guía por un eventual depósito de los sólidos o cristales que el líquido pueda contener y, además, los tubos guía muy largos pueden dañarse ante olas bruscas en la superficie del líquido o ante la caída violenta del líquido en el tanque.

Su exactitud es de ± 0,5%.

Los *medidores por palpador servooperado* (figura 5.4) disponen de un elemento de medida que consiste en un disco de desplazamiento suspendido por una cinta perforada (o un cable) de acero inoxidable que está acoplada a un tambor ranurado, el cual almacena o dispensa la cinta. El tambor está conducido por un servomotor controlado y montado en unos cojinetes de precisión. Cuando el nivel del producto sube o baja, el desplazador es subido o bajado automáticamente manteniendo el contacto con la superficie del producto. El tambor de medida está montado en el techo del tanque y dispone de un codificador óptico y del transmisor de los datos de nivel. Generalmente, la transmisión de la información es digital serie y codificada, sujeta a estándar.

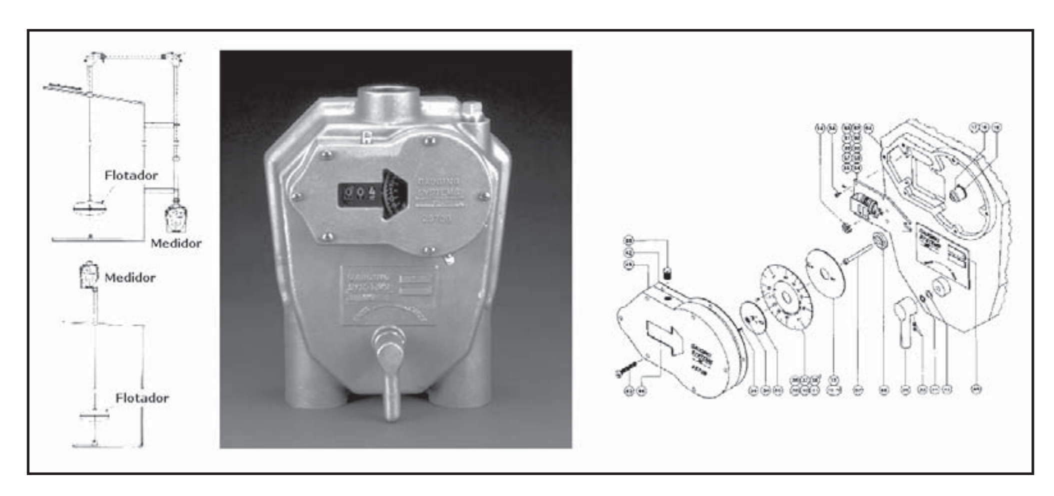


Figura 5.4 Medidor de nivel por palpador servooperado. Fuente: Gauging Systems Inc

Para proteger el disco palpador del oleaje que pueda producirse en el tanque se instala un tubo tranquilizador dotado de orificios.

El instrumento tiene una exactitud de ± 3 mm, y un campo de medida de 1 mm a 30 m.

El *medidor de nivel magnoestrictivo* utiliza un flotador cuya posición, que indica el nivel, se determina por el fenómeno de la magnetoestricción. Para detectar la posición del flotador, el transmisor envía un impulso alto de corriente de corta duración (impulso de interrogación) hacia abajo al tubo de guía de ondas, con lo que crea un campo magnético tubular que interacciona inmediatamente

con el campo magnético generado por los imanes del flotador. Esta interacción da lugar a una fuerza de torsión en el tubo, como si fuera una onda o vibración ultrasónica, que se traslada, a una velocidad típica, por el tubo guía hacia el circuito sensor que capta el impulso ultrasónico torsional y lo convierte en un impulso eléctrico. El circuito mide el intervalo de tiempo entre el impulso inicial de corriente y el impulso de retorno y lo convierte a una señal dentro del intervalo de 4-20 mA, y esta señal indica la posición del flotador, es decir, el nivel. El reloj utilizado en este sistema es capaz de medir el tiempo con una exactitud de 1/100 millonésimas de segundo.

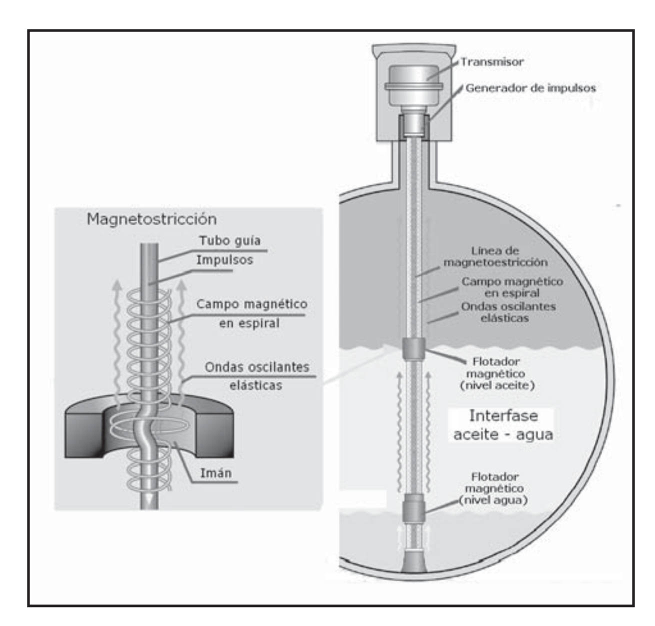


Figura 5.5 *Medidor de nivel magnetoestrictivo. Fuente: Tatsuno Corporation*

La velocidad de la señal es conocida y constante para la presión y temperatura del fluido y no es afectada por la espuma, y la única parte móvil del sistema es el flotador que se mueve según el nivel del líquido.

El ajuste del instrumento es fácil. Se sitúa el flotador donde se desea el cero y se pulsa un botón del circuito electrónico y lo propio se hace con el alcance (*span*).

El instrumento puede utilizarse en la medida de interfases líquido-líquido. La exactitud es del ± 0,01%. El alcance (*span*) es de 0,1 m a 5 m. La señal de salida puede ser de 4-20 mA c.c. con protocolos de comunicación HART, FOUNDATION Fieldbus, etc.

5.1.2 Instrumentos basados en la presión hidrostática

El *medidor manométrico* consiste en un sensor de presión piezoresistivo suspendido de la parte superior del tanque e inmerso en el líquido. El sensor contiene un puente de Wheastone y, bajo la presión del líquido, el sensor se flexa y la tensión que crea es captada por las galgas extensiométricos, dando lugar a un desequilibrio del puente y a una señal de salida proporcional a la presión aplicada, es decir, al nivel. El sensor está contenido en una caja protectora con un diafragma flexible y relleno de aceite de silicona lo que le da una gran robustez. Puede estar acoplado a un transmisor electrónico o digital de 4-20 mA c.c. y comunicaciones HART, Fielbus, etc. Su exactitud es de, ± 0,25%.

El sensor mide la presión debida a la altura de líquido h que existe entre el nivel del tanque y el eje del instrumento. Así, pues, el campo de medida del instrumento corresponderá:

$0 - h \times \gamma \times g$ pascal

con:

h = altura de el líquido en m

γ = densidad de líquido en kg/m^3

g = 9,8 m/s^2

o bien, expresando γ en g/cm^3 se obtendría 0 - 0,098 $\times h \times \gamma$ bar.



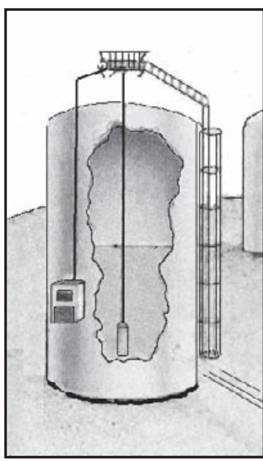


Figura 5.6 Medidor manométrico. Fuente ABB

El medidor de tipo *burbujeo* emplea un tubo sumergido en el líquido a cuyo través se hace burbujear aire mediante un rotámetro con un regulador de caudal incorporado (figura 5.7). La presión del aire en la tubería equivale a la presión hidrostática ejercida por la columna de líquido, es decir, al nivel. El regulador de caudal permite mantener un caudal de aire constante (unos 150 l/h) a través del líquido, independientemente del nivel. La tubería empleada suele ser de 1/2" con el extremo biselado para una fácil formación de las burbujas de aire. Una tubería de menor diámetro tipo capilar reduciría el tiempo de respuesta pero, en el caso de tanques pequeños y cambios de nivel rápidos, produciría un error en la medida provocado por la pérdida de carga del tubo.

La presión de aire en la tubería, es decir, el nivel, se mide mediante un manómetro de fuelles o un transductor de presión cuyo campo de medida corresponde a la presión máxima ejercido por el líquido (0,098 $\times h \times \gamma$ bar, con h en m y γ en g/cm^3).

El manómetro receptor puede colocarse hasta distancias de 200 m.

El sistema también puede emplearse en tanques cerrados con dos juegos rotámetro-regulador y con las señales de aire conectadas a un transmisor de presión diferencial análogo al estudiado en el capítulo de instrumentos de caudal.

Señalemos que no sólo puede utilizarse aire, sino también otros tipos de gases e incluso líquido como fluido de purga y que el tubo debe tener una longitud adecuada para evitar que las variaciones

bruscas del nivel introduzcan en su interior una cierta columna de líquido que retarde el paso del aire y falsee momentáneamente la lectura.

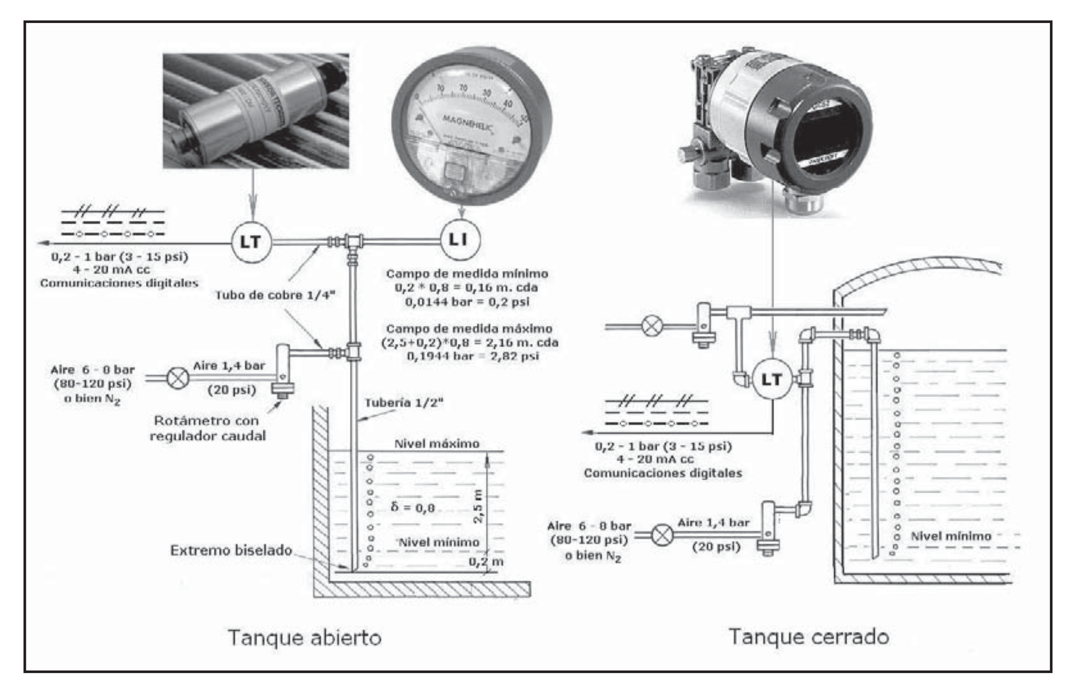


Figura 5.7 Medidor de tipo burbujeo

El método de burbujeo es simple y da buen resultado, en particular, en el caso de líquidos muy corrosivos o con sólidos en suspensión y en emulsiones. No se recomienda su empleo cuando el fluido de purga perjudica al líquido y para fluidos altamente viscosos donde las burbujas formadas del aire o del gas de purga presentan el riesgo de no separarse rápidamente del tubo. Desde el punto de vista de mantenimiento, es muy útil situar una T con un tapón en la parte superior del tubo para su limpieza periódica mediante una varilla o bien la inyección de aire o vapor a presión en el caso de que la parte final del tubo esté obturada.

El medidor de *presión diferencial* consiste en un diafragma en contacto con el líquido que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del tanque. En un tanque abierto, esta presión es proporcional a la altura del líquido en ese punto y a su peso específico (figura 5.8).

$$P = H \times \gamma \times g$$

en la que:

P = presión

H = altura de líquido sobre el instrumento

γ = densidad del líquido

g = 9,8 m/s^2

El diafragma forma parte de un transmisor neumático, electrónico o digital de presión diferencial.

En el tipo más utilizado, el diafragma está fijado en una brida que se monta rasante al tanque para permitir, sin dificultades, la medida de nivel de fluidos, tales como pasta de papel y líquidos con sólidos en suspensión, pudiendo incluso ser de montaje saliente para que el diafragma enrase completamente con las paredes interiores del tanque, tal como ocurre en el caso de líquidos extremadamente viscosos en los que no puede admitirse ningún recodo.

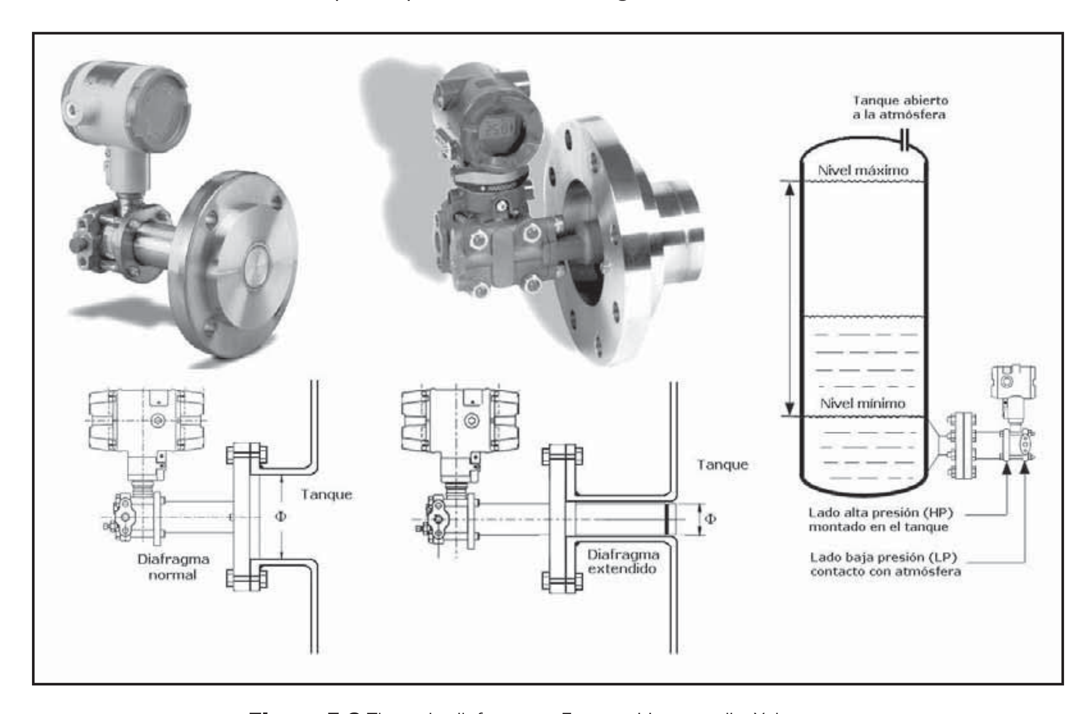


Figura 5.8 *Tipos de diafragmas. Fuente: Honeywell y Yokogawa*

Hay que señalar que el nivel cero del líquido se selecciona en un eje a la altura del diafragma. Si el instrumento se calibra en el tanque, el 0% del aparato debe comprobarse con el nivel más bajo en el borde inferior del diafragma (entre el borde inferior y el superior del diafragma la señal de salida no está en proporción directa al nivel).

Algunos fluidos presentan el riesgo de depósito de cristales o de sólidos en la superficie del diafragma. En tal caso, cabe la solución de emplear un diafragma recubierto de teflón para reducir el depósito gradual del producto. No obstante, como el movimiento del diafragma es muy pequeño y se considera el sólido algo flexible, continúa aplicándose la presión del líquido a todo el diafragma; sin embargo, si parte del diafragma queda rígido, el instrumento marcará de forma errática o permanente un nivel diferente del real. Este inconveniente se resuelve con una limpieza periódica o bien empleando un transmisor de nivel de presión diferencial con membranas de sello que responde a la presión transmitida en lugar de la fuerza creada por el líquido sobre la membrana (figura 5.9).

En el caso de que el tanque esté cerrado y bajo presión, hay que corregir la indicación del aparato para la presión ejercida sobre el líquido, debiendo señalar que la lectura será muy poco exacta si la presión es grande. Se suele conectar un tubo en la parte superior del tanque y medir la diferencia de presiones entre la toma inferior y la superior, utilizando transmisores de presión diferencial de diafragma tal como los representados en la figura 5.9.

Supresión de la señal del nivel

Cuando el transmisor de nivel está montado por debajo de la tubería que lo conecta al tanque, la toma de alta presión tiene una presión positiva cuando el nivel está al mínimo, de modo que señalaría nivel (1 m en la figura 5.9) en estas condiciones. Para que la señal del transmisor sea 4 mA c.c. (0,2 bar o 3 psi), es necesario suprimir la altura de líquido indicada. Para ello, en los transmisores neumáticos y electrónicos convencionales se utiliza el tornillo de supresión, que lo que hace es trasladar a la derecha (10 KPa o 0,1 bar suponiendo que el fluido sea agua) el cero del instrumento.

Elevación de la señal del nivel

En tanques cerrados y a presión con fluidos que pueden vaporizar a temperatura ambiente y a la presión de operación, existe el riesgo de condensación del líquido en la línea de compensación o tubería húmeda (*wet leg*) que comunica con la toma de baja presión del instrumento. Una solución es instalar un pote de condensado en la parte inferior de esta tubería con una válvula de asilamiento y purgar periódicamente el condensado, si bien, tiene el gran inconveniente del mantenimiento excesivo.

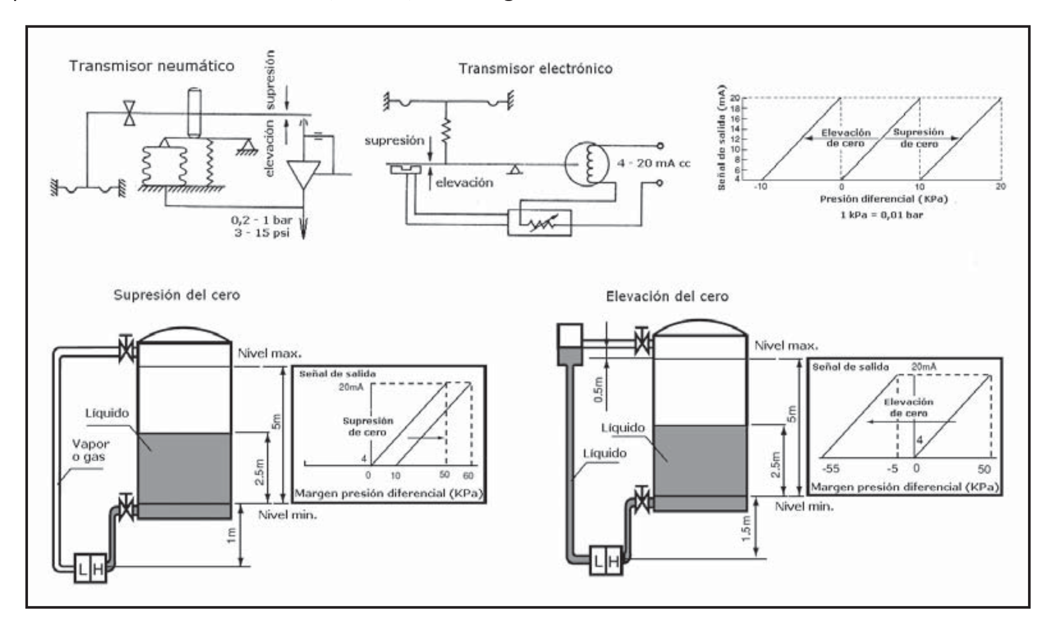


Figura 5.9 Tornillos de supresión y elevación en instrumentos neumáticos y electrónicos convencionales

Al ser condensables los gases o vapores que están sobre el líquido, la tubería húmeda (*wet leg*) se llena gradualmente con el condensado hasta llenar todo el tubo, en cuyo caso tendrá mayor presión que la tubería de alta presión (HP) y, por lo tanto, el transmisor leerá el nivel a la inversa (indicará bajo cuando el nivel sea alto y viceversa). Por lo tanto, cuando el nivel es mínimo, el transmisor enviará una señal inferior a 4 mA c.c. (0,2 bar o 3 psi). Por lo tanto, para que la señal sea positiva hay que elevarla (5,5 m en la figura 5.9 equivalente a 55 KPa o 0,55 bar suponiendo que el fluido es agua).

Para ello, en los transmisores neumáticos y electrónicos convencionales se utiliza el tornillo de elevación, que lo que hace es trasladar a la izquierda (55 KPa o 0,55 bar) el cero del instrumento.

En la figura 5.9 puede verse la disposición de los muelles de supresión y elevación. Otra solución, indicada en el caso de reactores o depósitos en los que el producto pueda polimerizar o solidificar

si baja la temperatura, es emplear un transmisor de presión diferencial unido con dos capilares a dos diafragmas conectados en las partes inferior y superior del tanque. Las tomas se tracean con vapor para evitar la condensación, o bien se utilizan sellos remotos. En la figura 5.10 puede verse un esquema de la instalación.

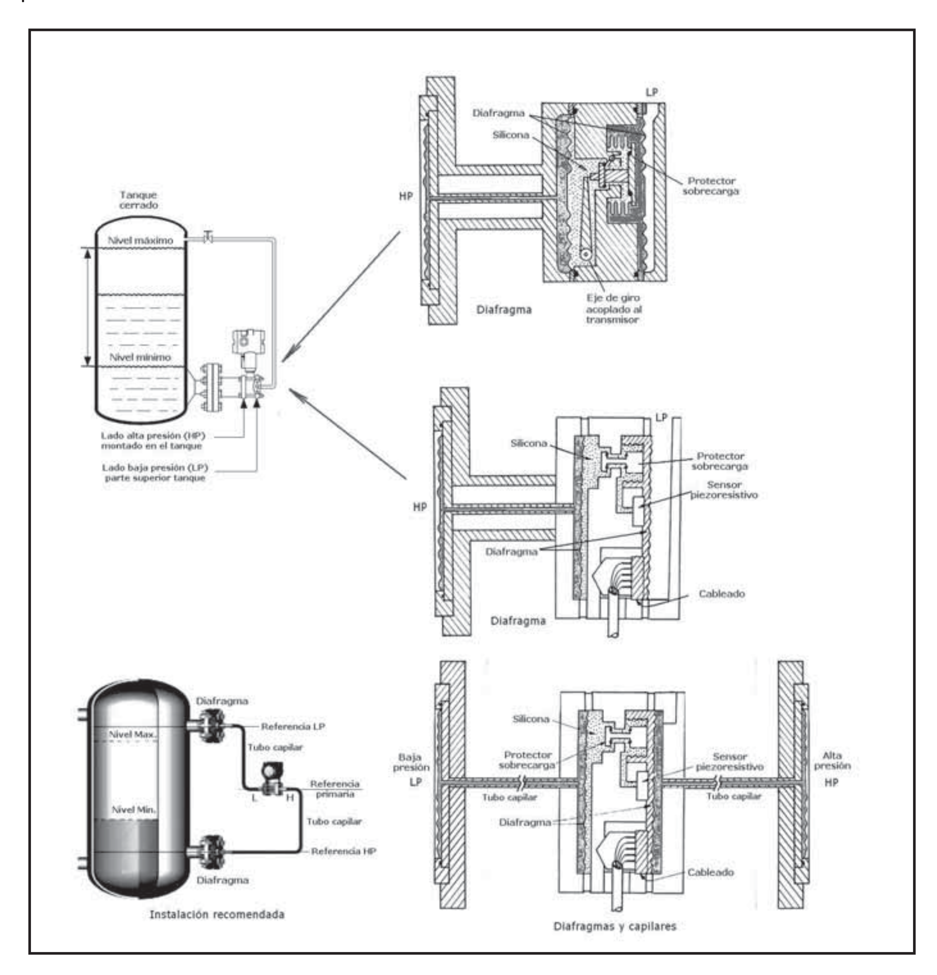


Figura 5.10 Medidores de presión diferencial en tanque cerrado

Es importante que los dos diafragmas estén a la misma temperatura para evitar los errores, en la medida, que se presentarían por causa de las distintas dilataciones del fluido contenido en el tubo capilar. Por otro lado, influyen también las características físicas del fluido del capilar, su longitud, su diámetro y su compensación para lograr la máxima exactitud en la medición del nivel se logra con un software de compensación o de sintonización del sistema de sellado del instrumento de presión diferencial.

Cuando el fluido es muy viscoso, la membrana puede quedar inmovilizada (solidificación de depósitos), de modo que para evitarlo, la medida se realiza mediante purga, limpieza con agua, etc., instalando, en ambas tomas, rotámetros reguladores y válvulas de retención. Si la purga es con líquidos, los rotámetros son armados y en el caso de gases no peligrosos ni tóxicos, pueden ser de vidrio.

Sin embargo, las soluciones anteriores corresponden a los tiempos pasados del control analógico. En los transmisores digitales con comunicaciones HART, Foundation Fielbus, etc., el ajuste del cero desde el punto de vista de la supresión o elevación forma parte de los ajustes normales del transmisor, de modo que los conceptos de supresión y elevación ya no son relevantes en los instrumentos modernos actuales.

En aplicaciones especializadas, el conjunto del transmisor de presión diferencial, la línea seca o húmeda o los tubos capilares se sustituye por transmisores de presión electrónicos separados, cuyas señales se introducen en un sistema multivariable mediante una red de comunicaciones. De este modo, se eliminan las incertidumbres y la deriva del cero, debidas a las posibles condensaciones en la tubería seca (*dry leg*) o a la evaporación del líquido en la tubería húmeda (*wet leg*) y los efectos de la temperatura en los tubos capilares, que cambian la densidad del líquido de relleno.

Los transmisores multivariables de nivel disponen de un sensor piezoresistivo que contiene tres sensores, presión diferencial, temperatura y presión estática. De este modo, pueden utilizarse en el caso de líquidos en tanque en los que varíen las condiciones de presión y temperatura y, por lo tanto, de densidad.

Dado que el clásico transmisor de diafragma mide la presión del líquido dentro del tanque y esta depende de la densidad del líquido, el uso del transmisor multivariable soluciona este inconveniente. El software corrige la variación de densidad para que la señal de salida se corresponda con el nivel real. Un caso claro de aplicación segura es la medición de nivel en una caldera de vapor donde la tubería de baja presión llena de condensado puede quedarse seca por la vaporización del vapor, con lo que la lectura del nivel de la caldera sería incorrecta con las complicaciones, en el funcionamiento seguro de la caldera, a que daría lugar.

Medición de la interfase de líquidos

La interfase puede medirse en tanques abiertos y cerrados bajo presión (figura 5.11).

En los tanques abiertos destinados a la separación de dos líquidos de diferente densidad, el líquido más denso descarga por una salida del tanque que corresponde al valor inferior del intervalo de medida del transmisor, mientras que por la salida superior circula el líquido más ligero que corresponde al valor superior del intervalo de medida. De este modo se verifica:

Señal de salida del transmisor con el tanque lleno del líquido más ligero = 4 mA c.c. (0% alcance):

$$p_a\,(0\%) = (h + h_a) \times \rho_2 \times g$$

Señal de salida del transmisor con el tanque lleno del líquido más denso = 20 mA c.c. (100% alcance):

$$p_a\,(100\%) = (h + h_a) \times \rho_1 \times g$$

$$Alcance\ (span) = p_a\,(100\%) - p_a\,(0\%)$$

El punto de interfase se encuentra con la fórmula:

$$Interfase = \frac{Presión\ diferencial\ leída\text{-}\ p_a(0\%)}{Alcance} \times (h + h_a)$$

Por ejemplo, si la interfase es agua-queroseno ($\rho = 0{,}8$), la descarga del líquido más denso está a 1,5 m de la línea de referencia del instrumento y la diferencia de alturas entre las dos salidas es de 3 m, tendremos:

Tanque con queroseno:

$$p_a\ (0\%) = (h + h_a) \times \rho_2 \times g = 4{,}5 \times 0{,}8 \times 0{,}098 = 0{,}35\ bar = 360\ mm\ cda$$

Tanque con agua:

$$p_a\ (100\%) = (h + h_a) \times \rho_1 \times g = 4{,}5 \times 1 \times 0{,}098 = 0{,}44\ bar = 450\ mm\ cda$$

$$Alcance\ (span) = p_a\ (100\%) - p_a\ (0\%) = 0{,}44 - 0{,}35 = 0{,}09\ bar = 90\ mm\ cda$$

De este modo, cuando el transmisor lee 0,35 bar (360 mm cda), el tanque está lleno con el fluido más ligero, y si lee 0,44 bar (450 mm cda), está lleno con el más denso.

Si el transmisor lee 0,40 bar (408 mm cda), es decir, envía la señal de 12,8 mA c.c., la interfase está en:

$$Interfase = \frac{Presión\ diferencial\ leída\text{-}\ p_a(0\%)}{Alcance} \times \left(h + h_a\right) = \frac{0{,}4 - 0{,}35}{0{,}09} \times 4{,}5 = 2{,}5\ m$$

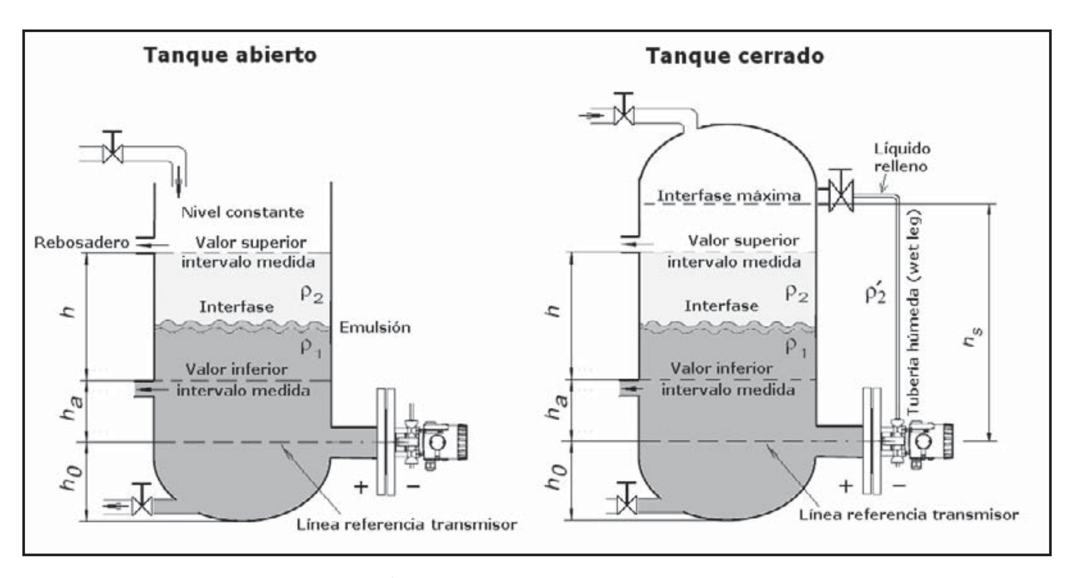


Figura 5.11 Medición de nivel de interfase en tanques abiertos y cerrados

Y, en un tanque cerrado, la toma de baja presión del transmisor de presión diferencial se conecta mediante una tubería húmeda (*wet leg*) al nivel del líquido más ligero (parte superior del tanque), mientras que la toma de alta presión se conecta a la parte inferior del líquido más denso. Procediendo como anteriormente:

Señal de salida del transmisor con el tanque lleno del líquido más ligero = 4 mA c.c. (0% alcance):

$$p_a\ (0\%) = (h + h_a) \times \rho_2 \times g - h_s \times \rho'_2 \times g$$

Señal de salida del transmisor con el tanque lleno del líquido más denso = 20 mA c.c. (100% alcance):

$$p_a\ (100\%) = (h + h_a) \times \rho_1 \times g - h_s \times \rho'_2 \times g$$

$$Alcance\ (span) = p_a\ (100\%) - p_a\ (0\%)$$

El punto de interfase se encuentra con la fórmula:

$$Interfase = \frac{Presión\ diferencial\ leída\ \text{-}\ p_a(0\%)}{Alcance} \times \left(h + h_a\right)$$

Por ejemplo, considerando la interfase agua-queroseno (ρ = 0,8), en un tanque cerrado bajo presión con la diferencia de alturas de entrada y salida de los líquidos de h = 3 m, el valor inferior del campo de medida h_a = 0,8 m, y la densidad del líquido de relleno de ρ'_2 = 0,7, resulta:

Tanque con queroseno:

$$p_a\ (0\%) = (h + h_a) \times \rho_2 \times g - h_s \times \rho'_2 \times g = 3,8 \times 0,8 \times 0,098 - 4 \times 0,7 \times 0,098 = = 0,0235\ bar = 24\ mm\ cda$$

Tanque con agua:

$$p_a\ (100\%) = (h + h_a) \times \rho_1 \times g - h_s \times \rho'_2 \times g = 3,8 \times 1 \times 0,098 - 4 \times 0,7 \times 0,098 = = 0,098\ bar = 100\ mm\ cda$$

$$Alcance\ (span) = p_a\ (100\%) - p_a\ (0\%) = 0,098 - 0,0235 = 0,0745\ bar = 76\ mm\ cda$$

De este modo, cuando el transmisor lee 0,0235 bar (24 mm cda) (4 mA c.c.), el tanque está lleno con el fluido más ligero, y si lee 0,0745 bar (76 mm cda) (20 mA c.c.), está lleno con el más denso.

Si el transmisor lee 0,085 bar (86,7 mm cda), es decir, envía la señal de 17 mA c.c., la interfase está en:

$$Interfase = \frac{Presión\ diferencial\ leída - p_a(0\%)}{Alcance} \times \left(h + h_a\right) = \frac{0,0858\text{-}0,0235}{0,0745} \times 3,8 = 3,17\ m$$

Es evidente que las aplicaciones de interfase comportan un alcance (*span*) muy pequeño, de modo que debe seleccionarse un transmisor especial de bajo alcance. Otra solución es utlizar un tanque más alto o bien debe escogerse un fluido de relleno de la tubería húmeda (*dry leg*) con menor densidad.

La exactitud del medidor de presión diferencial de diafragma es del ± 0,5% en los neumáticos, ± 0,2% al ± 0,3% en los electrónicos, ± 0,1% en los inteligentes con transmisión de 4-20 mA c.c., mientras que el transmisor digital alcanza el ± 0,075%, su rangeabilidad es de 20:1 y su tiempo medio entre fallos (MTBF) es de unos 470 años.

5.1.3 Instrumento basado en el desplazamiento

El medidor de nivel de tipo *desplazamiento* (figura 5.12) consiste en un flotador parcialmente sumergido en el líquido y conectado mediante un brazo a un tubo de torsión unido rígidamente al tanque o bien a un resorte de equilibrio del que pende el flotador.

En el modelo de *tubo de torsión* el flotador está suspendido de un pivote afilado, para reducir el rozamiento, situado en el extremo de un brazo y el otro extremo está soldado al tubo de torsión. Dentro del tubo, y unido a su extremo libre, se encuentra una varilla que transmite el movimiento de giro axial a un transmisor exterior al tanque. Al variar el nivel del líquido o la interfase en el caso de dos líquidos inmiscibles, cambia el peso del flotador con lo que la varilla libre del tubo de torsión gira en un movimiento proporcional al movimiento del flotador y, por lo tanto, al nivel.

El movimiento angular del extremo libre del tubo de torsión es muy pequeño, del orden de los 9°. El tubo proporciona, además, un cierre estanco entre el flotador y el exterior del tanque (donde se

dispone el instrumento receptor del par transmitido). Según el principio de Arquímedes, el flotador sufre un empuje hacia arriba que viene dado por la fórmula:

$$F = S \times H \times \gamma \times g$$

en la que:

F = empuje del líquido

S = sección del flotador

H = altura sumergida del flotador

γ = 9,8 m/s^2

y el momento sobre la barra de torsión es:

$$M = (S \times H \times \gamma \times g - P) \times l$$

siendo l el brazo del tubo de torsión y P el peso del flotador.

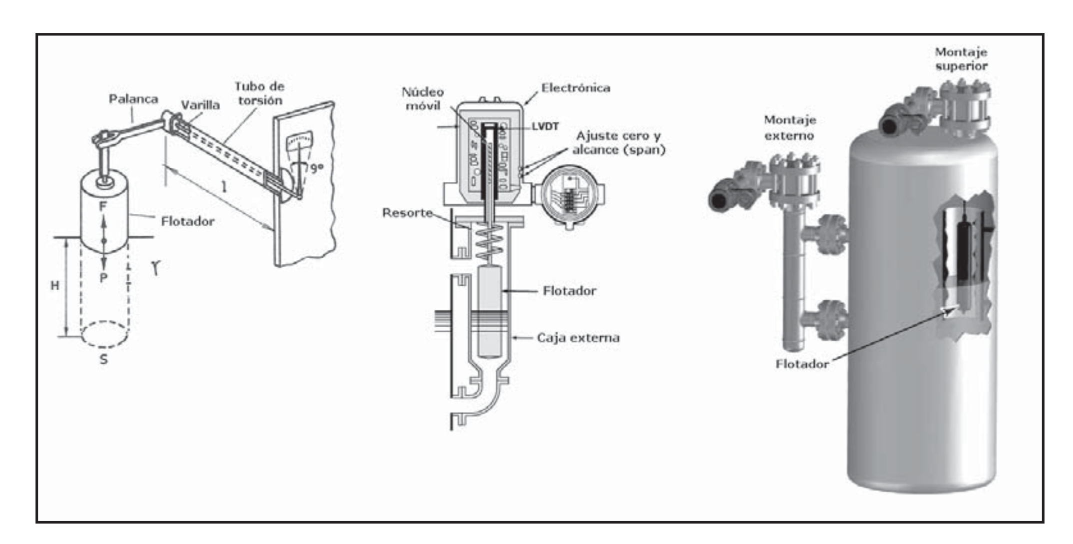


Figura 5.12 Medidor de nivel de desplazamiento

Tal como puede verse en la expresión anterior, al aumentar el nivel, el líquido ejerce un empuje sobre el flotador igual al volumen de la parte sumergida multiplicada por la densidad del líquido, tendiendo a neutralizar su peso propio, así que el esfuerzo medido por el tubo de torsión será muy pequeño. Por el contrario, al bajar el nivel, menor parte del flotador queda sumergida y la fuerza de empuje hacia arriba disminuye, resultando una mayor torsión.

El medidor de desplazamiento del tipo de barra de torsión es un instrumento voluminoso difícil de instalar y, al ser un instrumento mecánico con un pivote en forma de cuchillo, requiere un mantenimiento cuidadoso y constante.

En el modelo de *resorte*, el peso aparente del flotador (peso real - empuje del líquido) es transmitido directamente mediante un resorte en espiral especial de Nimonic (aleación de níquel), que lo convierte en un cambio de longitud, dado por la relación:

$$\frac{Peso\ flotador - empuje\ líquido}{Contracción\ del\ resorte}$$

Una varilla conectada al resorte sube o baja según el valor del nivel dentro de un tubo de presión estanco. Fuera del tubo se encuentra un transformador diferencial lineal (LVDT) que capta el movimiento de la varilla y proporciona una señal proporcional al nivel de líquido.

El instrumento es más compacto, más ligero, mucho más fácil de instalar y no tiene partes críticas soldadas, por lo que los períodos de mantenimiento son mucho más amplios que el instrumento de torsión.

Los instrumentos de este tipo se utilizan, básicamente, en servicios con fluidos sucios y temperaturas elevadas.

Estos instrumentos pueden utilizarse también en la medida de interfase entre dos líquidos inmiscibles de distinta densidad (por ejemplo, agua y aceite). En este caso, el flotador es de pequeño diámetro y de gran longitud y está totalmente sumergido. El peso del volumen desplazado por el flotador, es decir, el empuje, se compone entonces de dos partes, del líquido más denso en la parte inferior y del menos denso en la superior, con una línea de separación (interfase) de la que depende el par de torsión proporcionado al transmisor exterior. En efecto, si x es la zona del flotador inmersa en el liquido de mayor densidad, l es la longitud total del flotador y γ_1 y γ_2 son las densidades de los líquidos, resulta:

$$Empuje\ hacia\ arriba = F = Sx \times \gamma_1 \times g + S\ (l - x) \times \gamma_2 \times g$$

Se ve, claramente, que este empuje depende del nivel relativo de separación de los dos líquidos y que el alcance (*span*) está determinada por la diferencia entre las densidades de los líquidos, es decir:

$$F_{max} - F_{min} = S \times l \times \gamma_1 \times g - S \times l \times \gamma_2 \times g = S \times l(\gamma_1 - \gamma_2) \times g$$

Las dimensiones relativas del flotador (longitud y diámetro) dependerán, pues, de la amplitud de medida seleccionada.

Pueden utilizarse también para medir la densidad del líquido. En este caso, el flotador está totalmente sumergido. El campo de medida de densidades es bastante amplio, de 0,4 a 1,6.

El cuerpo del medidor puede estar montado directamente en el tanque (montaje interno) o en un tubo vertical al lado del tanque (montaje exterior).

La exactitud es del orden del ± 0,5% al ± 1% y el intervalo de medida puede variar de 0-300 mm c.d.a. a 0-3.000 mm c.d.a.

Los dos modelos descritos pueden utilizarse en fluidos sucios a altas presiones 170 bar (17 MPa - 2.465 psi) y temperaturas elevadas, desde 200 °C hasta 450 °C. Presentan el inconveniente del riesgo de depósito de sólidos o de crecimiento de cristales en el flotador que afectan a la precisión de la medida y sólo son aptos para la medida de pequeñas diferencias de nivel (2000 mm máximo estándar). La medida del nivel de interfases requiere flotadores de gran volumen. Disponen de un dispositivo que permite el ajuste del peso específico del fluido que se mide, así como un selector del modo de acción directa (al aumentar el nivel aumenta la señal de salida) o inversa (al aumentar el nivel disminuye la señal de salida).

5.1.4 Instrumentos basados en características eléctricas del líquido

El *medidor de nivel conductivo o resistivo* (figura 5.13) consiste en uno o varios electrodos y un circuito electrónico que excita un relé eléctrico o electrónico al ser los electrodos mojados por el líquido. Este debe ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito electrónico, y de este modo el aparato puede discriminar la separación entre el líquido y su vapor, tal como ocurre, por ejemplo, en el nivel de agua de una caldera de vapor. La impedancia mínima es del orden de los 25 MW/cm, y la tensión de alimentación entre los electrodos y el tanque es alterna para evitar fenómenos de oxidación en las sondas, por causa del fenómeno de la electrólisis.

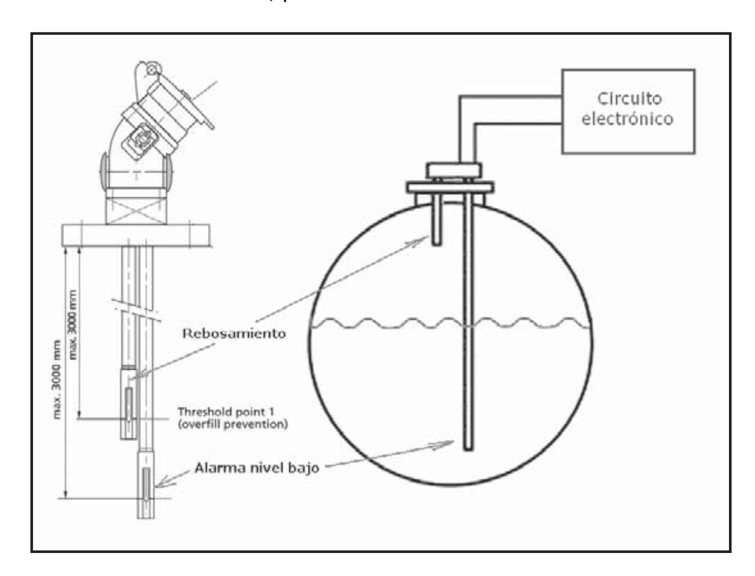


Figura 5.13 Medidor de nivel resistivo/conductivo

El relé electrónico dispone de un temporizador de retardo que impide su enclavamiento ante una ola del nivel del líquido o ante cualquier perturbación momentánea, o bien en su lugar se disponen dos electrodos poco separados enclavados eléctricamente en el circuito. El instrumento se emplea como alarma o control de nivel alto y bajo, y con la sensibilidad ajustable permite detectar la presencia de espuma en el líquido.

El *medidor de capacidad* (figura 5.14), conocido también por sensor de nivel de radiofrecuencia (RF) o de admitancia, mide la capacidad del condensador formado por un electrodo sumergido en el líquido y las paredes del tanque. Trabaja en la gama baja de radiofrecuencia de pocos MHz, midiendo la admitancia de un circuito de corriente alterna, la que varía según el nivel de líquido en el tanque. Para clarificar la descripción del instrumento de capacitancia, los términos admitancia e impedancia de un circuito de c.a. son comparables a los de conductancia y resistencia de un circuito de c.c., es decir, la admitancia es la medida de la conductividad de un circuito de c.a. y es la inversa de la impedancia.

La formula de la capacitancia del conjunto electrodo-tanque es:

$$C = K \times \frac{A}{D}$$

en la que:

C = capacitancia en picoFaradios (pF)

K = constante dieléctrica del material

A = área efectiva de los conductores

D = distancia entre los conductores

Como el sistema utiliza una señal de radiofrecuencia, debe considerarse adicionalmente la impedancia (Z), que es la oposición al flujo de corriente, según la ecuación:

$$Z = R + \frac{1}{\sqrt{1} \times 2\pi \times f \times C} = \frac{1}{k' \times f \times C}$$

en la que:

R = resistencia en ohms

C = capacitancia en pF

f = frecuencia de medida (radio frecuencia)

En el condensador, la distancia entre el electrodo y las paredes del tanque y el área de los conductores permanecen constantes, de modo que la única variable es el área bañada por el líquido, es decir, el nivel.

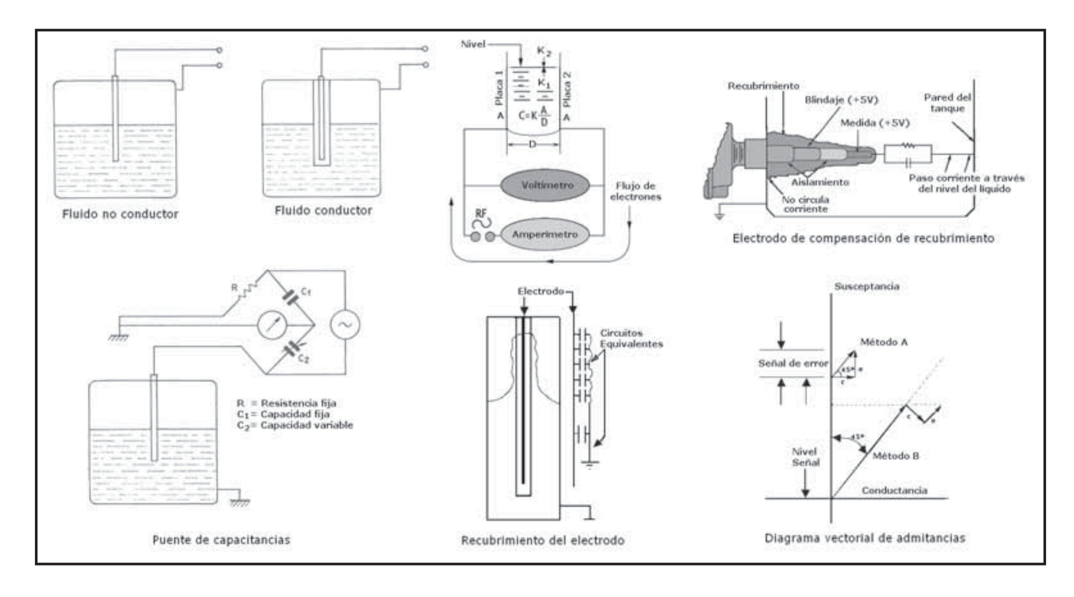


Figura 5.14 *Medidor de capacidad. Fuente: OMEGA*

La medida de la capacitancia se realiza mediante una señal de radiofrecuencia (RF) aplicada entre el electrodo y la pared del tanque. En aplicaciones de detección de nivel con electrodos horizontales, la señal de radiofrecuencia produce una pequeña corriente que circula a través del líquido hacia la pared del tanque. Si el nivel baja y el electrodo deja de ser mojado por el líquido y es expuesto a los gases o vapores que se encuentran sobre el líquido, baja la constante dieléctrica, con lo que

disminuye la capacitancia y se reduce la corriente. El cambio es detectado por un interruptor del circuito interno de nivel que excita un relé, dando la señal de bajo nivel. La detección del nivel suele disponer de temporizadores que filtran las falsas lecturas debidas a olas o rociaduras del líquido.

En el caso de medición continua del nivel, el electrodo es vertical y la señal de salida es analógica. Los cambios de capacitancia, que se producen al variar el nivel, vienen dados por la fórmula:

$$Cambio\ de\ capacitancia\ (pF) = (K_2 - K_1) \times \frac{A}{D}$$

siendo:

K_2 = constante dieléctrica del gas o vapor existente sobre el líquido

K_1 = constante dieléctrica del líquido

A = área efectiva de los conductores

D = distancia entre los conductores

Cuanta más alta sea la diferencia entre K_2 y K_1 más fácil será la lectura. Si la diferencia es pequeña (0,5 pF) será necesario usar un circuito electrónico de alta sensibilidad.

La constante dieléctrica depende de las condiciones de temperatura, humedad, densidad y tamaño de las partículas existentes en el líquido, de modo que si el cambio de capacitancia es alto, será necesario bajar la sensibilidad para evitar falsas lecturas por haber superado el umbral de capacitancia del sensor. La sensibilidad puede aumentarse alargando la longitud del electrodo, lo que es más práctico, o acercándolo más a las paredes del tanque.

En la tabla 5.1 pueden verse las constantes dieléctricas de diversos tipos de sólidos y líquidos.

El electrodo suele ser de acero inoxidable de ¼" o ½" de diámetro ,adecuado para los líquidos no conductores y no corrosivos. Si el fluido es conductor, con una conductividad mínima de 100 microhmios/c.c., el electrodo se recubre con Teflón o Kynar. Si no se recubriera, a medida que el nivel del líquido fuera bajando, el electrodo quedaría mojado dando lugar a una falsa capacitancia y a un error en la lectura. Cuando el tanque no es conductor y no puede captar la corriente de retorno de la señal de radiofrecuencia (RF) se dispone de un segundo electrodo paralelo al electrodo activo.

Los líquidos sucios o pegajosos tienen tendencia a recubrir el electrodo con lo que la lectura del nivel sería errónea.

Para que el electrodo ignore el efecto del recubrimiento conductor, se añade un segundo elemento al electrodo (blindaje de excitación), alimentado al mismo voltaje y frecuencia que el elemento de medida (tecnología de escudo perforado) (figura 5.14). De este modo, al no existir diferencia de potencial entre el blindaje de excitación y la sección de medida, la corriente no puede fluir a través del recubrimiento hacia las paredes del tanque, con lo cual se eliminan las señales erróneas debidas a la circulación de la corriente a través del recubrimiento conductor que envuelve la sonda.

El error de recubrimiento se ilustra en la figura 5.14. La porción sumergida del electrodo genera una capacitancia bastante pura. Virtualmente no existen componentes conductivos ya que el electrodo está aislado. Sin embargo, a causa de que la sección superior del electrodo está revestida con material conductor, éste genera una señal de error que consiste en un componente resistivo (conductancia) y uno capacitivo puro (susceptancia) desfasados 45°. El error de recubrimiento puede eliminarse de dos maneras.

Sólidos		Líquidos					
Constante dieléctrica (K)		Líquido	(ºF/ºC)	K	Líquido	(ºF/ºC)	K
Acetic Acid	4.1	Acetone	71/22	21.4	Heptano	68/20	1.9
Asbestos	4.8	Ammonia	-27/-33	22.4	Hexane	68/20	1.9
Asphalt	2.7	Aniline	32/0	7.8	Hydrogen Chloride	87/28	4.6
Bakelite	5.0	Benzene	68/20	2.3	Iodine	224/107	118.0
Calcium Carbonate	9.1	Benzil	202/94	13.0	Kerosene	70/21	1.8
Cellulose	3.9	Butane	30/-1	1.4	Methyl Alcohol	68/20	33.1
Ferrous Oxide	14.2	Carbon Tetrachloride	68/20	2.2	Methyl Ether	78/26	5.0
Glass	3.7	Castor Oil	60/16	4.7	Mineral Oil	80/27	2.1
Lead Oxide	25.9	Chlorine	32/0	2.0	Naphthalene	68/20	2.5
Magnesium Oxide	9.7	Chloroform	32/0	5.5	Octane	68/20	2.0
Naphthalene	2.5	Cumene	68/20	2.4	Pentane	68/20	1.8
Nylon	45.0	Cyclohexane	68/20	2.0	Phenol	118/47	9.9
Paper	2.0	Dimethylheptane	68/20	1.9	Phosgene	32/0	4.7
Phenol	4.3	Dimethylpentane	68/20	1.9	Propane	32/0	1.6
Polyethylene	4.5	Dowtherm	70/21	3.3	Pyridine	68/20	12.5
Polypropylene	1.5	Ethanol	77/25	24.3	Styrene	77/25	2.4
Porcelain	5.7	Ethyl Acetate	68/20	6.4	Sulphur	752/400	3.4
Quartz	4.3	Ethyl Benzene	68/20	2.5	Toluene	68/20	2.4
Rubber (Hard)	3.0	Ethyl Benzene	76/24	3.0	Urethane	74/23	3.2
Sand	3.5	Ethyl Ether	68/20	4.3	Vinyl Ether	68/20	3.9
Sulphur	3.4	Ethylene Chloride	68/20	10.5	Agua	32/0	88.0
Sugar	3.0	Formic Acid	60/16	58,5	Agua	68/20	80,0
Urea	3.5	Freon 12	70/21	2.4	Agua	212/100	48.0
Zinc Sulfide	8.2	Glycol	68/20	41.2	Xylene	68/20	2.4
Teflon	2.0						

Tabla 5.1 *Constantes dieléctricas de varios tipos de líquidos. Fuente: Omega*

El método A resta la componente capacitiva de la señal total de salida, con lo que la señal de error se cancela. El método B introduce un cambio de fase de 45° a la medida completa, el cual cancela, automáticamente, la parte de la señal debida al error.

Este tipo de instrumentos se caracterizan porque la medida del nivel depende principalmente de la constante dieléctrica del material más que de su conductividad. Por este motivo, se pueden usar en la detección de nivel puntual y continua de materiales conductores y no conductores, tales como agua, espumas, pastas, líquidos viscosos, fangos, etc. y también en la detección de la interfase de los líquidos inmiscibles.

El circuito electrónico tiene una señal de salida de 4-20 mA c.c. o una señal de salida digital compatible con las comunicaciones HART, FOUNDATION Fieldbus, etc. La exactitud es del ± 0,25%. El alcance mínimo es de 4 pF y el límite superior del intervalo de medida es de 2.500 pF.

En fluidos no conductores, se emplea un electrodo normal y la capacidad total del sistema se compone de la del líquido, la del gas superior y la de las conexiones superiores. En fluidos conductores

con una conductividad mínima de 100 microhmios/c.c., el electrodo está aislado, usualmente con teflón, interviniendo las capacidades adicionales entre el material aislante y el electrodo en la zona del líquido y del gas.

El circuito electrónico (puente de capacidades) alimenta el electrodo a una frecuencia elevada, lo cual disminuye la reactancia capacitiva del conjunto y permite aliviar, en parte, el inconveniente del posible recubrimiento del electrodo por el producto.

El montaje del electrodo debe ser tal que no sea afectado por el impacto del líquido que entra en el depósito. La medición de nivel en tanques metálicos de gran diámetro con líquidos de baja constante dieléctrica, tal como el almacenamiento de hidrocarburos, presenta problemas. Se resuelven seleccionando electrodos concéntricos y montándolos en posiciones que queden libres del choque con el fluido durante la carga del tanque (la capacitancia fluctúa).

Debido a la influencia de la temperatura, el contenido de humedad, carga estática, composición, conductividad y recubrimiento de los electrodos en la indicación del nivel, el sistema de capacitancia no se utiliza en el inventariado de líquidos en tanques.

El medidor de capacitancia debe calibrarse en campo para el cero y el 100% de la señal. La exactitud es del ± 1%.

5.1.5 Medidor de nivel de ultrasonidos

El *sistema ultrasónico de medición de nivel* (figura 5.15) se basa en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflectante y la recepción del eco del mismo en un receptor. El retardo en la captación del eco depende del nivel del tanque.

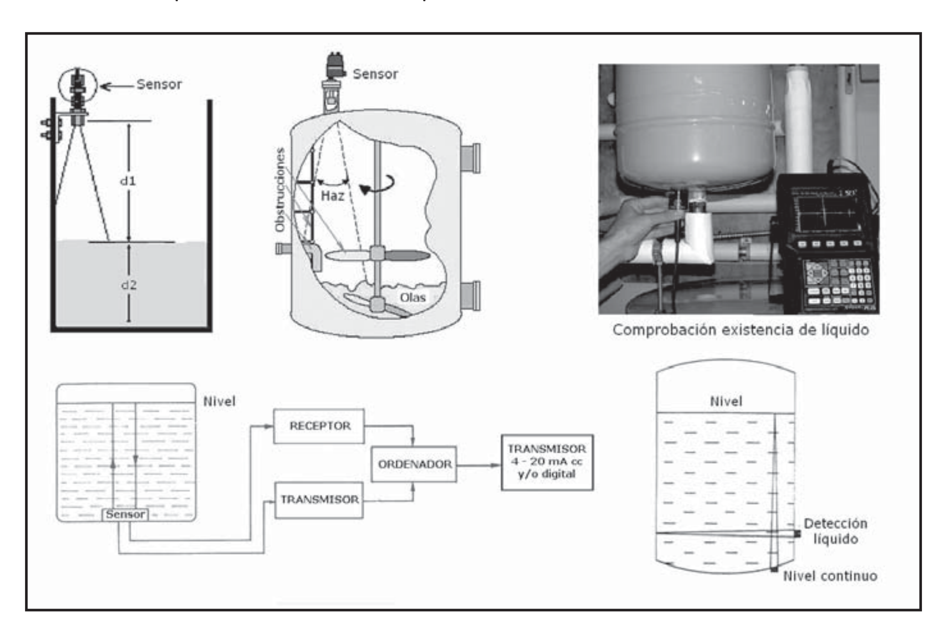


Figura 5.15 Transductor ultrasónico de nivel

Si el sensor se coloca en el fondo del tanque, envía un impulso eléctrico que es convertido mediante un transductor (cristal piezoeléctrico) a un impulso ultrasónico de corta duración, que es

transmitido a través de la pared del tanque hacia el líquido. El impulso se refleja en la superficie del líquido y retorna hasta el transductor ultrasónico. El nivel del tanque viene expresado por:

$$h = \frac{v \times t}{2}$$

siendo:

h = nivel del líquido

v = velocidad del sonido en el líquido

t = tiempo de tránsito del sonido

Pero la aplicación típica es situar el emisor en la parte superior del tanque y dirigir el impulso ultrasónico a la superficie del líquido para ser reflejado y retornar al receptor. El transductor del receptor realiza los cálculos para convertir esta distancia en el nivel del líquido en el tanque.

La medida del nivel en estas condiciones puede ser afectada por varios factores:

- La velocidad del sonido en el líquido que varía con la temperatura, de modo que un ambiente que pase de 0 °C a 70 °C da lugar a un error del 12% en la medida del nivel. Este efecto puede compensarse mediante un sensor de temperatura.
- La presencia de espuma en la superficie del líquido que absorbe el sonido.
- La turbulencia extrema en el seno del líquido y el movimiento de la superficie del líquido (olas, etc.), que puede compensarse con un circuito amortiguador o temporizador en el instrumento.
- El material y el estado de las paredes del tanque (paredes gruesas, corrosión, etc.), la curvatura del tanque y las obstrucciones.
- Las burbujas de gas o vapor existentes y los sedimentos en el fondo.

El método ultrasónico también es útil para determinar si en un tanque o una tubería hay o no líquido, ya que el tipo de eco es distinto. En otra aplicación, el transductor está montado en la pared del tanque y dirige el impulso hacia arriba en un ángulo determinado y el receptor se encuentre en la misma pared, pero más arriba, con lo que el sistema permite captar la existencia de líquido a una cierta altura del tanque, siendo la aplicación más útil en la detección en el nivel superior y en el fondo del tanque.

Los sensores trabajan a una frecuencia de 20 kHz a 200 kHz. Estas ondas atraviesan con cierto amortiguamiento o reflexión, el medio ambiente de gases o vapores, aumentando o disminuyendo la velocidad del sonido y se reflejan en la superficie del sólido o del líquido. A frecuencias mayores (unos 50 kHz) las ondas sónicas penetran las capas de aire o vapores del tanque con menor amortiguamiento.

En la figura 5.15 puede verse el diagrama de bloques de un sistema de medida de ultrasonidos. El sensor emisor dispone de un oscilador excitador para enviar un impulso ultrasónico a la superficie del fluido y el sensor receptor recibe esta señal reflejada, enviando una señal función del tiempo transcurrido y, por lo tanto, del nivel a un transmisor electrónico analógico dotado de protocolo HART para la obtención de una señal digital.

La exactitud de estos instrumentos es de unos ± 5 mm o bien del ± 0,25% al ± 1%. Los instrumentos son adecuados para todos los tipos de tanques y de líquidos o fangos, pudiendo construirse a prueba de explosión. Presentan el inconveniente de ser sensibles a la densidad de los fluidos y de

dar señales erróneas si hay obstrucciones en el interior del tanque o bien cuando la superficie del nivel del líquido no es nítida, como es el caso de un líquido que forme espuma, ya que se producen falsos ecos de los ultrasonidos.

La utilización del microprocesador permite, a través de un programa, almacenar el perfil ultrasónico del nivel, y así tener en cuenta las características particulares de la superficie del líquido, tal como la espuma, compensando con el software los falsos ecos y las variaciones de velocidad del sonido, con lo cual se mejora la exactitud de la medida. Por otro lado, el ordenador facilita la conversión del nivel a volumen del tanque para usos de inventario y, además, proporciona características de auto comprobación (*self-checking*) del instrumento.

5.1.6 Medidor de nivel de radar o microondas

El sistema de *radar de microondas* se basa en la emisión continua de una onda electromagnética, típicamente dentro del intervalo de los rayos X (10 GHz). El sensor está situado en la parte superior del tanque y envía las microondas hacia la superficie del líquido. Una parte de la energía enviada es reflejada en la superficie del líquido y la capta el sensor. El tiempo empleado por las microondas es función del nivel en el tanque.

Una técnica empleada es utilizar una onda continua modulada en alta frecuencia (por encima de los 10 GHz), de modo que se detecta la diferencia de frecuencia entre la señal emitida y el eco recibido. La técnica recibe el nombre de FMCW (*Frequency Modulated Continuous Wave* - Onda continua modulada en frecuencia).

La diferencia de frecuencias es proporcional al tiempo empleado por estas señales de transmisión y retorno, es decir, al nivel. Y así:

$$d = \frac{v \times dt}{2}$$

con:

$$v = \frac{c}{\sqrt{e}}$$

siendo:

d = distancia del emisor al líquido

v = señal de velocidad

dt = tiempo de recorrido

c = velocidad de la luz

e = constante dieléctrica

La fórmula anterior indica que la velocidad de la microonda a través del aire (u otro gas o vapor) es igual a la velocidad de la luz dividida por la raíz cuadrada de la constante dieléctrica del gas o vapor. Como la constante dieléctrica de los vapores sobre el líquido es casi la unidad, la variación de la velocidad es despreciable, por lo que puede afirmarse que la espuma es transparente a la señal de radar y, por lo tanto, deja de ser un problema, tal como ocurría en el medidor de nivel de ultrasonidos. Otra ventaja de esta técnica es que las señales de medida del nivel son en FM en lugar de AM, lo que suprime los ruidos parásitos del tanque que se encuentran en la banda de AM.

Si la constante dieléctrica del líquido es baja, pueden presentarse problemas en la medida ya que, en este caso, la energía reflejada es muy pequeña. El agua ($\varepsilon_r = 80$) produce una reflexión excelente en la superficie del líquido.

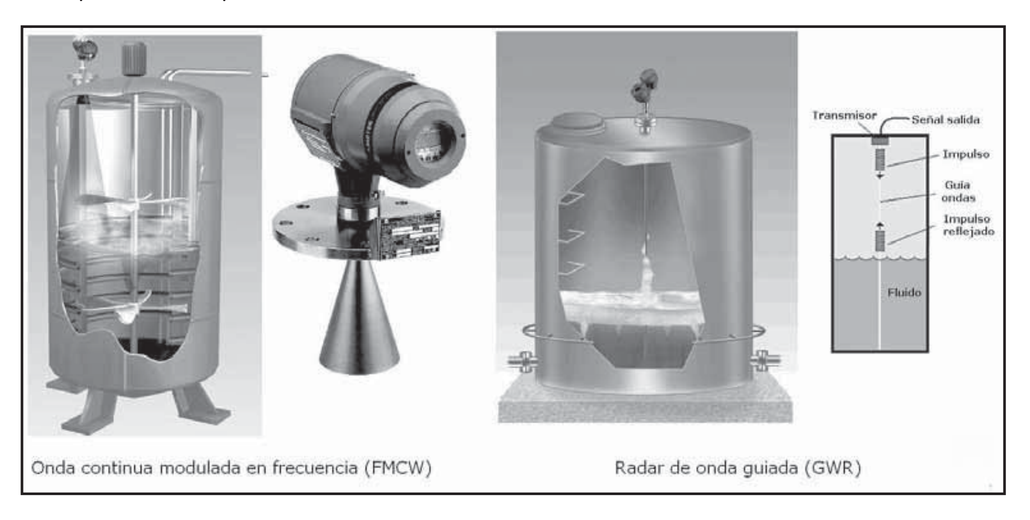


Figura 5.16 Medidor de nivel de radar

Un oscilador de estado sólido genera una frecuencia de barrido de 10 a 11 GHz y enfoca la señal sobre el líquido por medio de una antena. Esta puede ser de disco parabólico, que dirige las señales en una amplia área, o de cono que las confina en un haz más estrecho. Sin embargo, las ondas de radar experimentan las mismas dificultades que los transmisores de ultrasonidos. Sus lecturas pueden ser erróneas debido a las obstrucciones, tuberías internas, formación de depósitos en la antena y múltiples reflexiones dentro del tanque. Se han utilizado técnicas de lógica difusa (*fuzzy logic*) y algoritmos complejos en el transmisor, por lo que la puesta en marcha es engorrosa y los cambios, en el proceso en el tanque, pueden dar lugar a problemas.

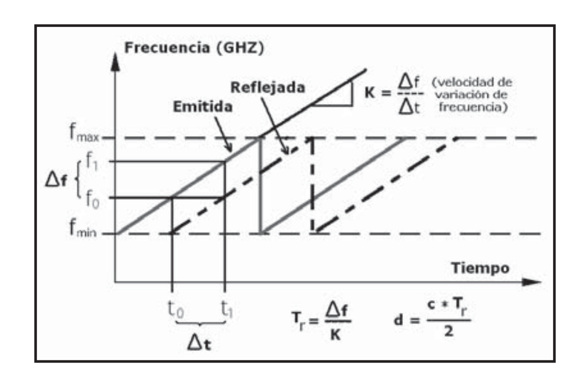


Figura 5.17 Señales en un sistema de radar FMCW

Si K es la relación de variación de frecuencia ($K = \Delta f/\Delta t$), la relación dF/K proporciona el tiempo T_r y, de aquí, la distancia desde el cabezal del sensor a la superficie del líquido en el tanque:

$$d = (c \times T_r)/2.$$

El movimiento del líquido (olas, etc.) puede hacer aparecer una frecuencia Doppler, lo que puede falsear la medida de la diferencia entre las frecuencias detectadas.

Para evitar este tipo de problemas, prácticamente todos los radares de onda continua emiten una onda electromagnética cuya variación de frecuencia va aumentando en un tramo, mientras que en el otro disminuye, consiguiendo así, eliminar el efecto de la frecuencia Doppler, ya que en un tramo estaría sumando y en el otro restando.

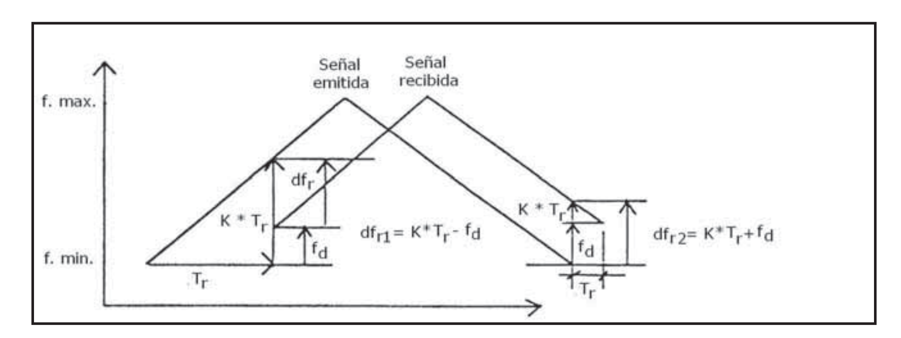


Figura 5.18 Eliminación del efecto por frecuencia Doppler

De este modo, se verifica:

$$df_{r1} = K \times T_r - f_d$$

$$df_{r2} = K \times T_r + f_d$$

$$df_{r1} + df_{r2} = 2K \times T_r$$

luego:

$$T_r = (df_{r1} + df_{r2}) / 2K$$

Los bancos de filtrado Doppler utilizan esta diferencia en frecuencia entre la señal emitida y la recibida.

Para conseguir la exactitud necesaria, únicamente hay que tener en cuenta la deriva de la señal electromagnética, y gracias al uso de muy altas frecuencias, del orden de gigahertzios, esta exactitud llega a ser del orden de ± 1 mm.

El filtrado de la señal correcta se consigue mediante microprocesadores, realizando una transformada rápida de Fourier de las señales mezcladas, lo que ralentiza el sistema, de modo que se realizan de 1 a 4 mediciones por segundo. Esta velocidad es suficientemente rápida para una medición precisa en el tanque, pero insuficiente en el caso de superficies con turbulencias, factor habitual en muchas aplicaciones de proceso.

Como desventajas figuran la dificultad de operar con materiales de baja constante dieléctrica, menor de 2,5, debido a la incapacidad para obtener una señal de retorno al receptor, y el trabajar con haces de gran divergencia.

Otro método utilizado es el de *radar de onda guiada* (GWR – *Guide Wave Radar*) que dispone de una varilla o un cable para guiar las microondas desde el sensor hasta la superficie del líquido y hasta el fondo del tanque y que soluciona los inconvenientes del sistema anterior FMCW.

Dispone de un reflectómetro en el dominio del tiempo (TDR – *Time Domain Reflectometer*), técnica utilizada para localizar roturas de cables de gran longitud, que genera más de 200.000 impulsos de energía electromagnética, que atraviesa el fluido y retorna. La constante dieléctrica del fluido da lugar a un cambio en la impedancia y desarrolla una reflexión de la onda. El tiempo de tránsito de los impulsos es una medida del nivel.

Con este método se minimiza la degradación de la señal, ya que se enfoca íntegramente la energía a través de la varilla o cable, sin enviarla a través del aire como en el caso del método de FMCW, lo que permite medir niveles de líquidos de baja constante dieléctrica (K < 1,7 con relación a K = 80 del agua).

Asimismo, como los impulsos están guiados, se evitan los efectos de la espuma, las turbulencias y las obstrucciones del tanque y se consigue un rendimiento 20 veces mayor.

El sistema no es influido por la composición del gas o vapor que se encuentra sobre el líquido, ni por la temperatura, ni por la presión, puede trabajar en vacío sin ninguna recalibración y no es afectado por la mayor parte de capas de espuma.

A tener en cuenta que la varilla o cable guía pueden ser afectados por la corrosión del líquido o por choques mecánicos con el agitador del tanque.

El sistema de medida del nivel tipo radar es adecuado para asfaltos, parafinas y productos muy densos o viscosos, que no sean homogéneos y sufran estratificaciones.

Las características típicas de los medidores de radar son:

- Repetibilidad + 1 mm.
- Exactitud para tanques en general + 5 mm.
- Exactitud para tanques de entrega de productos a facturar + 1 mm.

5.1.7 Medidor de nivel de radiación

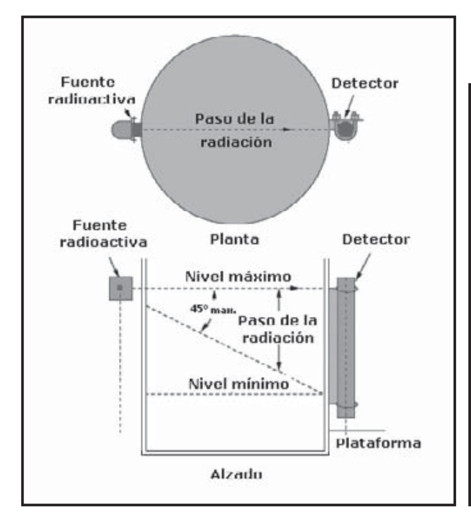
El sistema de *radiación* (medición por rayos gamma) consiste en un emisor de rayos gamma montado verticalmente en un lado del tanque y con un contador Geiger que transforma la radiación gamma recibida en una señal eléctrica de corriente continua.

Otro tipo de detector consiste en un haz de fibras ópticas que transmiten los fotones luminosos, creados en la estructura cristalina (dotada de materiales dopantes) cuando reciben la radiación gamma, a un tubo fotomultiplicador.

Como la transmisión de los rayos es inversamente proporcional a la masa del líquido en el tanque, la radiación captada por el receptor es inversamente proporcional al nivel del líquido, ya que el material absorbe parte de la energía emitida.

Los rayos emitidos por la fuente son similares a los rayos X, pero de longitud de onda más corta. La fuente radiactiva pierde igualmente su radiactividad en función exponencial del tiempo. La vida media (es decir, el tiempo necesario para que el emisor pierda la mitad de su actividad) varía según la fuente empleada.

En el cobalto 60 (nivel energético 1,33 MeV) es de 5,3 años, en el cesio 137 (nivel energético 0,56 MeV) es de 33 años y en el americio 241 es de 458 años. La medida continua requiere que la electrónica disponga de compensación automática de la deriva por decaimiento radiactivo de la fuente.



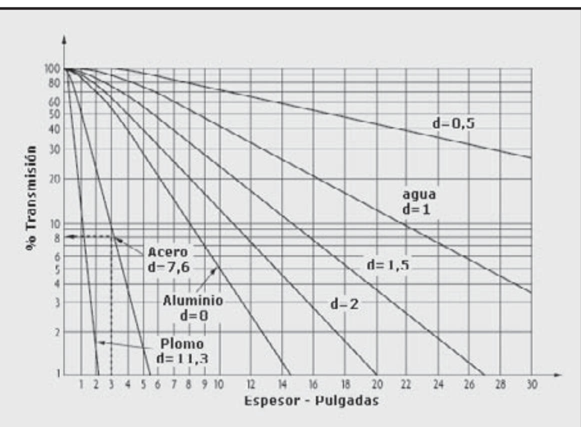


Figura 5.19 Medidor de nivel radiactivo (rayos γ de Cesio 137)

Las paredes del tanque absorben parte de la radiación y al detector sólo llega un pequeño porcentaje. Los detectores son, en general, tubos Geiger o detectores de cámara iónica y utilizan amplificadores de c.c. o de c.a. El instrumento dispone de compensación de temperatura, de linealización de la señal de salida y de reajuste de la pérdida de actividad de la fuente de radiación, extremo este último a tener en cuenta para conservar la misma exactitud de la puesta en marcha. Como desventajas en su aplicación figuran el blindaje de la fuente y el cumplimiento de las leyes sobre protección de radiación, que en nuestro país están reglamentadas por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

La intensidad de la radiación recibida por el detector depende del isótopo del emisor, de la densidad y demás características físicas del fluido, del espesor de las paredes del recipiente, del espesor de los aislamientos y de la distancia emisor/receptor, prefiriéndose el método en el que la fuente de radiación sea de menor actividad. Los microprocesadores han aportado una mayor sensibilidad a este tipo de medida de nivel, permitiendo una mayor duración de aprovechamiento de la fuente y una mayor seguridad para el personal ,ya que puede utilizarse la fuente con menores niveles de radiación.

El diseño, instalación y mantenimiento de estos medidores debe ajustarse a la normativa, debiendo tener:

- Certificado de aprobación de diseño de prototipo.
- Certificado de control de calidad.
- Certificado de actividad y hermeticidad.
- Señalización exterior en los equipos (norma UNE 23077) y grabado de forma indeleble de la firma comercializadora, la naturaleza y actividad de las fuentes, el fabricante, el modelo, el número de serie, la fecha de fabricación y el contenido radiactivo. Y en el exterior de las fuentes radiactivas, el número de identificación, el símbolo químico y el número másico del radionuclido, como mínimo.

Previamente a su instalación, debe ser tramitada la documentación adecuada para obtener la autorización del Consejo de Seguridad Nuclear.

El personal que trabaja con estos medidores debe tener la preparación adecuada y seguir las Normas de seguridad especiales dadas por el fabricante, con la garantía de las correspondientes Autoridades Nucleares. Tendrá la licencia de supervisor u operador de instalaciones radioactivas, concedida por el Consejo de Seguridad Nuclear.

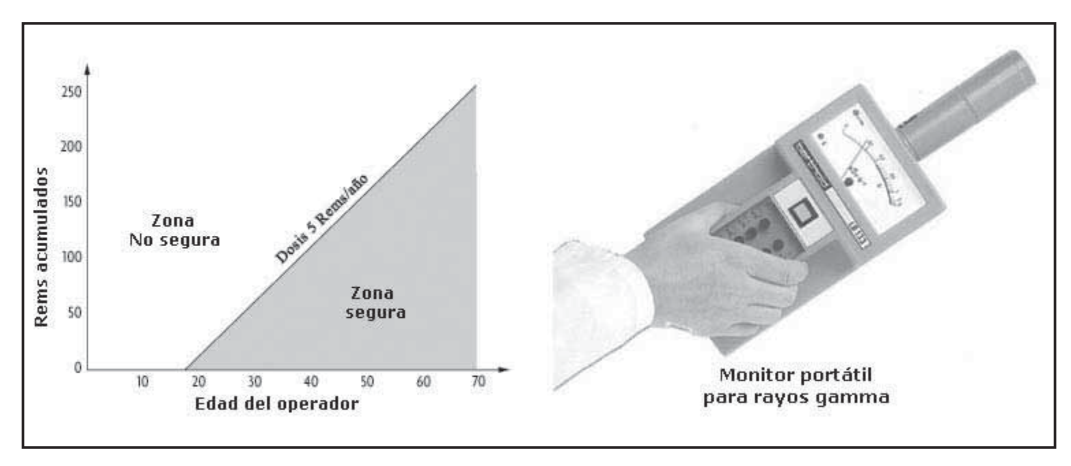


Figura 5.20 Dosis de radiación de Cesio 137 admisible para los operadores

La intensidad de radiación está limitada por la Comisión de Regulación Nuclear (NRC – *Nuclear Regulatory Comisión*) a 5 miliroentgens/hora a una distancia de 0,3 m (12").

Por ejemplo, una fuente de Cesio 137 de 10 mCi (constante de la fuente K = 0,6) se instala en un tanque de agua de alta presión con paredes de 13 mm (0,5"). Deben satisfacerse dos criterios:

1º La intensidad de la radiación que capta el detector debe disminuir el 50% cuando el nivel pasa del 0% al 100%.

2ª La radiación máxima en el detector cuando el tanque está vacío no debe superar el límite de seguridad de 2,4 mR/h pero si que puede exceder de 1 mR/h para poder excitar el detector de cámara iónica. La intensidad de radiación en el aire, cuando no hay tanque entre el emisor y el receptor, considerando que esta distancia es de 1,2 m (48"), vale:

$$Dosis = K \times \frac{mCi}{1000} \times \frac{1}{d^2} = 0{,}34 \times \frac{10}{1000} \times \frac{1}{1{,}2^2} = 0{,}0024\ r/h = 2{,}4\ mR/h$$

siendo:

K = constante específica de radiación gamma (γ) (tasa de exposición a 1 m de distancia de una fuente puntual de 1 Ci de actividad nuclear Curie = 0,34 R/h por Ci a 1 m)

mCi = tasa de actividad de 1 miligramo de Radio 226

d = distancia entre el emisor y el receptor

A señalar que la fuente está blindada en todas direcciones excepto hacia el tanque. Cuando el tanque está vacío, el operador recibirá la máxima energía a través de sus paredes, de valor 49% (figura 5.19):

$$0{,}49 \times 2{,}4\ mR/h = 1{,}176\ mR/h$$

Que es menor que la dosis segura de radiación (5 mR/h), pero superior a la que necesita el detector (cámara iónica 1 mR/h, interruptor Geiger-Mueller 0,5 mR/h y detector de centelleo 0,1 – 0,2 mR/h).

Cuando el tanque está lleno, el grueso de 1,2 m (48") de agua reduce la intensidad de radiación en 3,5% adicional:

$$0{,}035 \times 2{,}4 = 0{,}084 \ mR/h$$

o sea:

$$1{,}176 - 0{,}084 = 1{,}092 \ mR/h$$

Que es superior al 1 mR/h para poder excitar el detector de cámara iónica.

La exactitud de la medida es del ± 0,5% al ± 2%.

El instrumento puede emplearse para todo tipo de líquidos, ya que no está en contacto con el proceso. Su lectura viene influida por el aire o por los gases disueltos en el líquido. El sistema se emplea en caso de medida de nivel en tanques de acceso difícil o peligroso. Es ventajoso cuando existen presiones elevadas en el interior del tanque que impiden el empleo de otros sistemas de medición. Hay que señalar que el sistema es caro y que la instalación no debe ofrecer peligro alguno de contaminación radiactiva, siendo necesario señalar debidamente las áreas donde están instalados los instrumentos y realizar inspecciones periódicas de seguridad.

5.1.8 Medidor de nivel láser

En aplicaciones donde las condiciones son muy duras, y donde los instrumentos de nivel convencionales fallan, encuentra su aplicación el medidor *láser* (y también el de radiación). Tal es el caso de la medición de metal fundido, donde la medida del nivel debe realizarse sin contacto con el líquido y a la mayor distancia posible por existir unas condiciones de calor extremas.

El sistema mide el nivel de forma parecida al medidor de nivel de ultrasonidos con la diferencia de que emplea la luz en lugar del sonido. Consiste en un rayo láser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) enviado a través de un tubo de acero y dirigido por reflexión en un espejo sobre la superficie del metal fundido. La señal puede ser por impulsos o por onda continua modulada en alta frecuencia. En el primer caso, cada impulso de láser llega hasta el nivel de líquido y regresa al receptor. En forma parecida a la del nivel por radar, la distancia desde el sensor hasta el nivel se calcula por la fórmula:

$$Distancia = \frac{(Velocidad\ de\ la\ luz) \times (tiempo\ transcurrido)}{2}$$

La señal pulsante tiene buena penetración y un gran intervalo de medida, por lo que es la típica usada en aplicaciones industriales.

La señal láser de onda continua está modulada en alta frecuencia y cambia de fase al chocar contra el nivel de líquido. Cuando alcanza el receptor, el circuito electrónico calcula la distancia midiendo el desfase entre la onda emitida y la recibida, la frecuencia y la longitud de onda.

El sistema de rayo láser no es influido por los cambios de temperatura y presión, ni por las turbulencias y las capas de gases, ni por los materiales absorbentes del sonido y, asimismo, tampoco por los de baja constante dieléctrica (como ocurre en el medidor de nivel de radar). Es inmune a reflexiones y ecos provocados por polvo y al movimiento de palas del agitador.

El rayo láser emitido tiene muy poca divergencia por lo que puede dirigirse a través de pequeños espacios u orificios (50 mm diámetro) y es ideal en depósitos con muchas obstrucciones. La velocidad en la toma de datos del nivel puede llegar a ser de 3 lecturas por segundo. La energía del rayo láser está limitada para que no sea necesario llevar gafas de seguridad. Es un instrumento relativamente caro, pero es más económico que el de radiación.

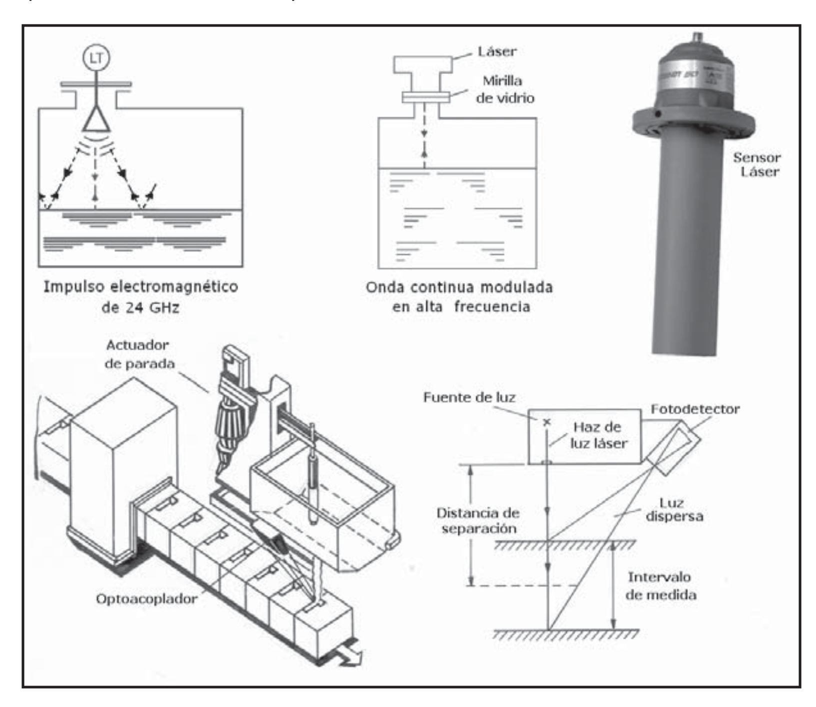


Figura 5.21 Medidor de nivel láser

5.1.9 Otros fenómenos

El *detector de nivel óptico* opera mediante la transmisión, reflexión o refracción de luz visible, infrarroja o láser, basándose en el principio de diferencia de índices de refracción entre el líquido y el gas o vapor presente en su superficie.

El *detector de nivel vibratorio* consiste en una horquilla que vibra a su frecuencia de resonancia. Cuando la horquilla es mojada por el líquido reduce su frecuencia, con lo que un circuito electrónico cierra o abre un contacto o excita un microprocesador compatible con salida TTL o un transistor de alta potencia.

El *detector de nivel térmico* o de *dispersión térmica* consiste en dos sondas de resistencia, una de las cuales se calienta y la otra está a la temperatura del proceso, con lo que proporcionan dos resistencias diferentes. Cuando no hay líquido, la diferencia es mayor y cuando aumenta el nivel y moja las dos sondas, la sonda caliente se refrigera y se reduce la diferencia de temperaturas. Un circuito electrónico convierte la diferencia de resistencias en una señal en voltios de c.c. que excitan un contacto SPDT (conmutador unipolar) o DPDT (conmutador bipolar). El instrumento también puede utilizarse para detectar interfases de líquidos.

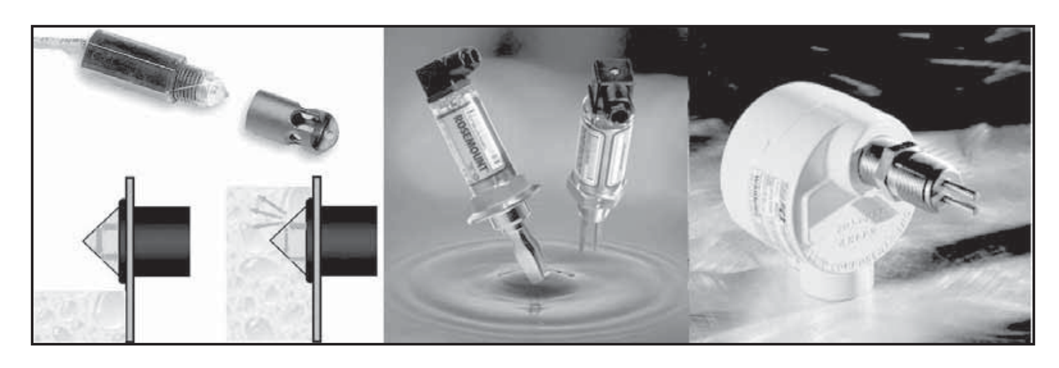


Figura 5.22 Detectores de nivel óptico, vibratorio y térmico.
Fuentes: Honeywell, Rosemount, y Fluid Components

5.1.10 Medidor másico de nivel

La medición directa del contenido másico mediante presión hidrostática (HTG – *Hydrostatic Tank Gauging*) precisa de la instalación de una sonda de temperatura y de dos transmisores de presión de muy alta exactitud (P1 y P2), estabilidad y repetibilidad, separados entre sí por una distancia fija. En el caso de tanques cerrados a presión, es necesario el uso de un tercer transmisor (P3) para medir la presión en la parte superior del tanque.

Estando los transmisores separados una distancia fija, la lectura de la diferencia de presiones P1 y P2 combinada con la temperatura de almacenamiento señalada por una sonda de resistencia Pt100, permite el cálculo de la densidad estándar del líquido. La masa del líquido se determina multiplicando la presión hidrostática del fondo del tanque por su área. El nivel se determina dividiendo la masa del líquido por la densidad estándar (volumen estándar) y dividiendo el resultado por el área del tanque.

$$Densidad = \frac{P_{\inf} - P_{media}}{h_{mi}}$$

$$Nivel = \frac{P_1 - P_s}{Densidad} + h_i$$

$$Masa = (P_1 - P_s) \times \text{área media del tanque}$$

$$Volumen = \frac{Masa}{Densidad}$$

La temperatura media tomada entre la parte inferior y la media del tanque permite corregir la densidad y el volumen calculados.

Otros factores que influyen son la configuración del tanque, los asentamientos del tanque en el terreno y las variaciones de densidad en las capas del líquido. La exactitud conseguida en el cálculo inventariable del volumen del tanque es de ± 0,1%, frente al típico ± 0,3% conseguido con un medidor de nivel hidrostático clásico. La exactitud en la medida de la masa llega al ± 0,01%.

El sistema dispone de una unidad de cálculo en línea, situada en campo, hasta una distancia de 150 m del tanque. En ella se efectúan los cálculos de masa, densidad, volumen, nivel, etc. Los transmisores instalados en los tanques están unidos entre sí, y con el módulo de cálculo, mediante un par

de hilos que alimentan simultáneamente las comunicaciones digitales. La presión es transmitida con independencia de los posibles cambios en la densidad del producto, de forma que se evitan las recalibraciones por variación de dicha densidad.

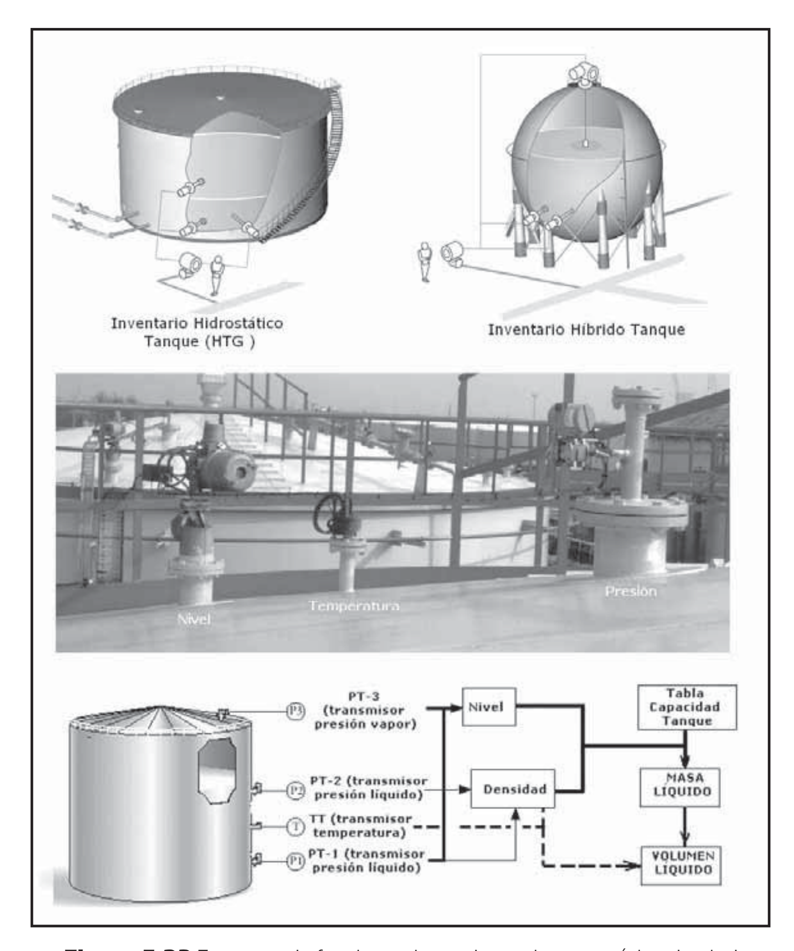


Figura 5.23 Esquema de funcionamiento de un sistema másico de nivel

El sistema híbrido para medida de masa, nivel y densidad, combina la aplicación por radar (que mide muy bien el nivel y el volumen), con el contenido másico por presión hidrostática (HTG – *Hydrostatic Tank Gauging*) que mide bien la densidad y la masa y utiliza la *Tabla de Capacidad del Tanque* (TCT – *Tank Capacity Table*). De este modo, se obtiene una buena medida de densidad, masa, nivel, volumen, temperatura, etc., resultando un sistema muy apropiado para inventarios, balances y trasvases, y para la medida de la densidad en tanques de mezclas (*blending* en tanques).

5.2 Medidores de nivel de sólidos

En los procesos continuos, la industria ha ido exigiendo el desarrollo de instrumentos capaces de medir el nivel de sólidos en puntos fijos o de forma continua, en particular en los tanques o silos destinados a contener materias primas o productos finales.

Instrumento	Campo de medida	Exactitud % de la escala	Pres. máx. bar	Temp. Max. Fluido, °C	Desventajas	Ventajas
Sonda	Limitado	0,5 mm	Atm.	60	Manual, sin olas Tanques abiertos	Barato, exacto
Cristal	Limitado	"	150	300	Sin transmisión, en algunos procesos no se puede utilizar	Seguro, exacto, barato, indicación visual
Flotador	0-10 m	±1-2%	400	250	Posible agarrotamiento, solo utilizarlo en líquidos limpios	Simple, independiente de la naturaleza líquido, interfases con flotadores de densidad determinada
Manométrico	Altura tanque	± 1%	Atm.	60	Tanques abiertos, fluidos limpios	Barato
Membrana	0-25 m	± 1%	Atm.	60	Tanques abiertos	Barato
Burbujeo	Altura tanque	± 1%	400	200	Le afecta la densidad del líquido, mantenimiento importante, contaminación líquido por sustancias externas	Barato, versátil
Presión diferencial	0-10 m	± 0,1% a ± 0,5%	150	600	Le afecta la densidad del líquido, posible agarrotamiento membrana y purga con líquido, caro	Compensa cambios presión en la parte superior del tanque, interfase líquido
Desplazamiento	0 - 25 m	± 0,5%	100	400	Le afecta la densidad del líquido, expuesto a corrosión, no adecuado para aguas negras, caro	Fácil limpieza, robusto, medida interfases, muy exacto
Conductivo	Limitado	± 3 mm	80	800	Solo líquidos conductores, medida en un punto, interfase solo entre líquidos conductores y no conductores	Barato, versátil, sin partes móviles, no es influido por cambios temperatura o densidad
Capacitivo	0-6 m	± 1%	80 a 250	200 a 800	Le afecta la densidad del líquido, recubrimiento del electrodo, es difícil la medida interfases y la detección de espuma	Resistencia a la corrosión
Ultrasónico	0-3 m	± 1%	400	200	Caro, sensible a densidad, espuma, humedad del vapor	Todo tipo tanques y líquidos, sin contacto con el líquido
Radar	0-30 m	± 2,5mm		230	Sensible a la constante dieléctrica del líquido, turbulencia excesiva, palas del agitador y al recubrimiento del líquido	Todo tipo tanques y líquidos y espuma
Radiación	0-2,5 m a ± 2%	± 0,5% o ± 6 mm	–	150	Fuente radiactiva, caro, aprobación de la Junta Energía Nuclear	Todo tipo tanques (sin contacto líquido)
Láser	10 mm a ± 2%	± 0,5%	—	1500	Líquidos turbios con vapor transparente	Todo tipo tanques (sin contacto líquido)
Óptico	Limitado	± 6 mm	—	120	El modelo de refracción solo para líquidos limpios, el de reflexión necesita vapores limpios en la superficie	Barato
Vibratorio	Limitado	± 5 mm	—	150	–	Barato
Dispersión térmica	Limitado	± 10 mm	—	450	La detección de espuma y de interfases limitada la conductividad térmica	Barato
HTG	0-25 m	± 0,1%	Atm.	200	–	Masa, nivel, densidad
Híbrido	0-25 m	± 0,1%	Atm.	200	–	Masa, densidad, inventario mezclas

Tabla 5.2 *Medidores de nivel de líquidos*

Los detectores de nivel de punto fijo proporcionan una medida en uno o varios puntos fijos determinados. Los sistemas más empleados son el diafragma, los interruptores de nivel alto con sonda, el capacitivo, las paletas rotativas, el de vibración y el medidor de *radar de microondas*.

Los medidores de nivel continuo proporcionan una medida continua del nivel desde el punto más bajo al más alto. Entre los instrumentos empleados se encuentran el de *sondeo electromecánico*, el

de báscula, el capacitivo, el de ultrasonidos, el de radar de microondas, el de radiación y el láser. En la figura 5.24 pueden verse los sistemas de medición de nivel de sólidos fijos y continuos.

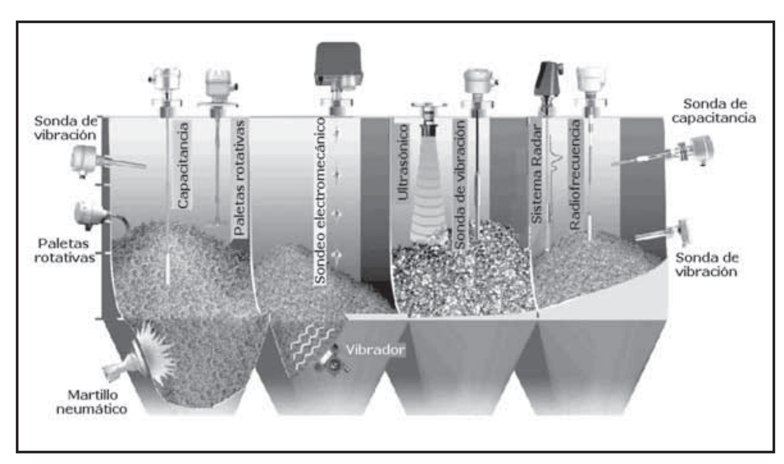


Figura 5.24 Sistemas de medición de nivel de sólidos fijos y continuos

5.2.1 Detectores de nivel de punto fijo

El *detector de diafragma* (figura 5.25) consiste en una membrana flexible que puede entrar en contacto con el producto dentro del tanque y que actúa sobre un microrruptor.

El material del diafragma puede ser de tela, goma, neopreno o fibra de vidrio. El medidor de diafragma tiene la ventaja de su bajo coste y trabaja bien con materiales de muy diversa densidad. La exactitud es de ± 50 mm.

Los *interruptores de nivel alto* (figura 5.26) están montados en la parte superior o lateral del tanque y consisten en una sonda de tubo, o paleta o varilla flexible, que excita un microrruptor cuando el sólido los alcanza. Son aparatos de bajo coste, necesitan estar protegidos y se utilizan sólo en tanques abiertos. La exactitud es de ± 25 mm.

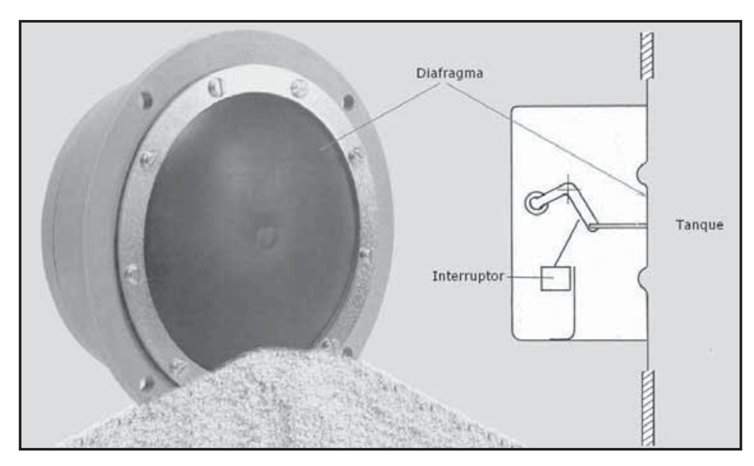


Figura 5.25 Medidor de diafragma. Fuente: Kobold

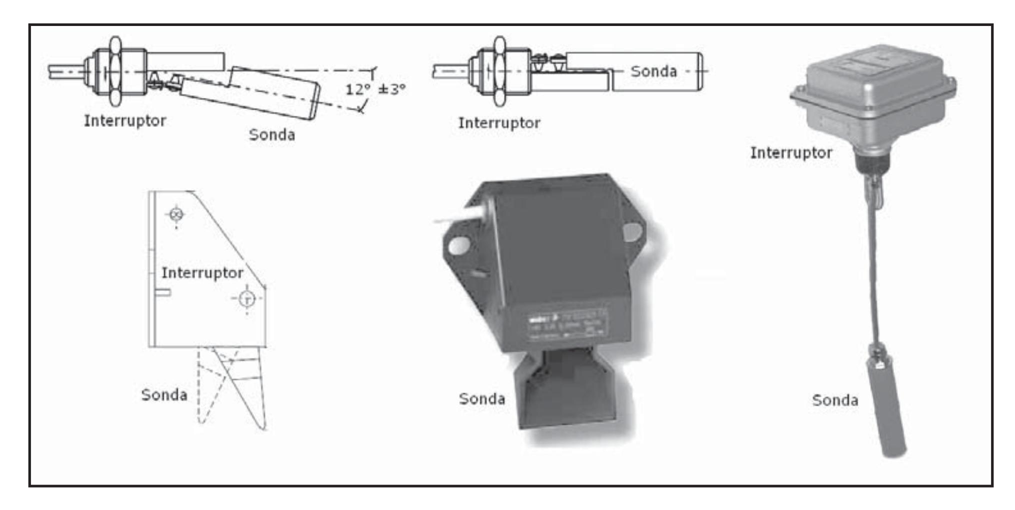


Figura 5.26 Interruptor de nivel alto por sonda. Fuentes: Elobau, Braime

El *medidor capacitivo* es un detector de proximidad capacitivo, dotado de un circuito oscilante RC que está ajustado en un punto crítico y que entra en oscilación cuando se encuentra próximo al lecho del sólido. El aparato se monta en el tanque, en posición vertical o inclinada, y su sensibilidad se coloca al mínimo para evitar el riesgo de excitación del aparato en el caso de que una mínima cantidad del sólido pueda depositarse en el detector. La exactitud es de ± 25 mm.

Las *paletas rotativas* (figura 5.27) consisten en un eje vertical, dotado de paletas, que gira continuamente a baja velocidad accionado por un motor síncrono.

Cuando el producto sólido llega hasta las paletas, las inmoviliza, con lo que el soporte del motor y la caja de engranajes empiezan a girar en sentido contrario actuando, consecutivamente, sobre dos interruptores, el primero excita el equipo de protección (por ejemplo, una alarma) y el segundo desconecta la alimentación eléctrica del motor. Cuando el producto baja de nivel y deja las palas al descubierto, un resorte vuelve el motor a su posición inicial liberando los dos microrruptores. De este modo, el motor se excita con lo que las palas vuelven a girar y la alarma queda desconectada.

El eje de las palas puede ser flexible o rígido para adaptarse así a las diversas condiciones de trabajo dentro del silo (caída de producto, deslizamientos del producto, etc.). Estos aparatos son adecuados en tanques abiertos a baja presión, tienen una exactitud de unos ± 25 mm y se emplean preferentemente como detectores de nivel de materiales granulares y carbón. Pueden trabajar con materiales de muy diversa densidad y existen modelos a prueba de explosión.

En la figura 5.27 puede verse una aplicación típica de un control de nivel de sólidos en un tanque, que mantiene el nivel máximo en el punto donde está situado el detector.

El *detector de vibración* (figura 5.28) consiste en una sonda de vibración en forma de horquilla que forma parte de un sistema resonante mecánico excitado piezoeléctricamente. Cuando el material entra en contacto con la sonda amortigua su vibración, lo que detecta el circuito electrónico actuando sobre un relé y una alarma al cabo de un tiempo de retardo ajustable. Algunos instrumentos disponen de un sistema autolimpiante que impide el bloqueo de la sonda por el producto. Es adecuado para una gran variedad de polvos, carbon, azúcar, grano, cemento y arena. La exactitud es del ± 1%.

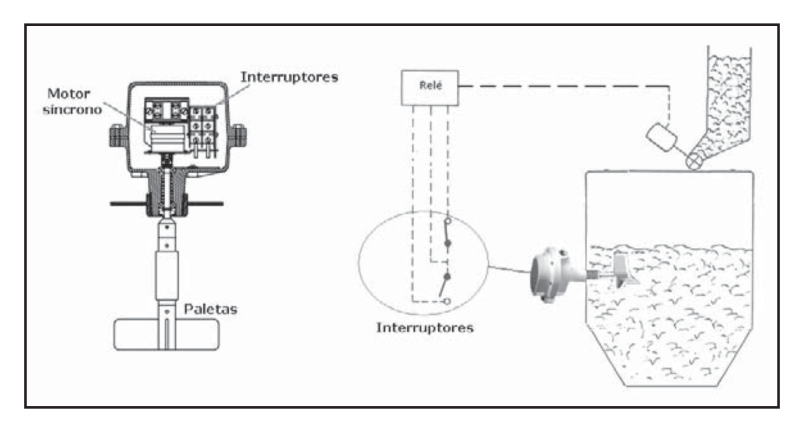


Figura 5.27 Medidor de paletas rotativas y control de nivel de sólidos

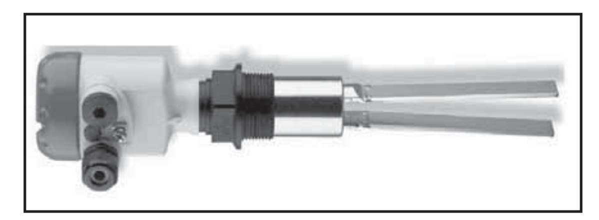


Figura 5.28 Detector de vibración. Fuente: OPTISWITCH

El *medidor de radar de microondas*, similar al de medida de nivel de líquidos, consta de una fuente de microondas, situada a un lado del recipiente, y un detector en el lado opuesto, en la misma horizontal. Cuando el producto alcanza dicha horizontal, la señal deja de recibirse y se excita una alarma. Se aplica en la detección de bajo nivel de sólidos abrasivos.

5.2.2 Detectores de nivel continuos

El medidor de nivel de *sondeo electromecánico*, representado en la figura 5.29, consiste en un pequeño peso móvil sostenido por un cable, desde la parte superior del silo, mediante poleas. Un motor y un programador situados en el exterior establecen un ciclo de trabajo del peso.

Éste baja suavemente en el interior de la tolva hasta que choca contra el lecho de sólidos. En este instante, el cable se afloja y un detector adecuado invierte el sentido del movimiento del peso con lo que éste asciende hasta la parte superior de la tolva, donde se para, repitiéndose el ciclo nuevamente. Un indicador exterior señala el punto donde el peso ha invertido su movimiento, indicando así el nivel en aquel momento. El instrumento se caracteriza por su sencillez, puede emplearse en el control de nivel, pero debe ser muy robusto mecánicamente para evitar una posible rotura del conjunto dentro de la tolva, lo que podría dar lugar a la posible rotura de los mecanismos de vaciado. La exactitud es del ± 1%.

El *medidor de* nivel de *báscula* (figura 5.30) mide el nivel de sólidos indirectamente a través del peso del conjunto tolva más producto; como el peso de la tolva es conocido, es fácil determinar el peso del producto y, por lo tanto, el nivel. La tolva se apoya en una plataforma de carga actuando sobre la palanca de una báscula o bien carga sobre otros elementos de medida neumáticos, hidráulicos o eléctricos (galga extensiométrica y microprocesador).

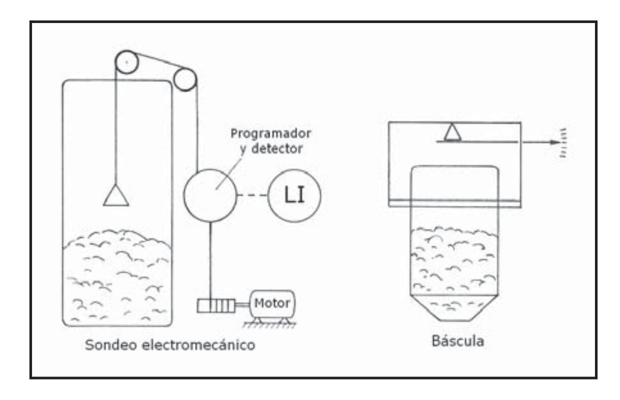


Figura 5.29 Sondeo electromecánico

De estos elementos, uno de los más empleados es el de *galga extensiométrica*. El sistema es relativamente caro, en particular en el caso de grandes tolvas, pudiendo trabajar a altas presiones y temperaturas. Su exactitud depende del sensor utilizado, pudiendo variar del ± 0,5% al ± 1%.

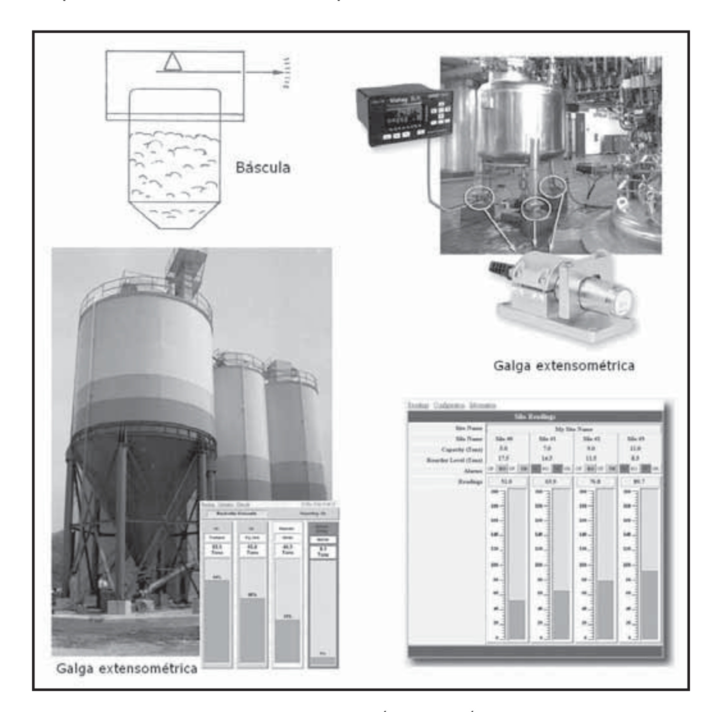


Figura 5.30 Medidor de báscula y células de carga

El *medidor de* nivel *capacitivo* (figura 5.31) es parecido al estudiado en la medición de nivel de los líquidos, con la diferencia de que tiene más posibilidades de error por la mayor adherencia que puede presentar el sólido en la varilla capacitiva. La lectura viene influida, además, por las variaciones de densidad del sólido. La varilla del medidor está aislada y situada verticalmente en el tanque y bien asegurada mecánicamente para resistir la caída del producto y las fuerzas generadas en los deslizamientos internos del sólido.

La medida está limitada a materiales, en forma granular o en polvo, que sean buenos aislantes, la presión y temperatura máximas de servicio pueden ser de 50 bar y 150 °C y el aparato debe calibrarse para cada tipo de material. Su precisión es de unos ± 15 mm aproximadamente.

El *medidor de nivel de ultrasonidos* (figura 5.32) consiste en un emisor de ultrasonidos que envía un haz horizontal a un receptor colocado al otro lado del tanque. Si el nivel de sólidos está más bajo que el haz, el sistema entra en oscilación enclavando un relé. Cuando los sólidos interceptan el haz, el sistema deja de oscilar y el relé se desexcita actuando sobre una alarma o sobre la maquinaria de descarga del depósito.

Disponiendo el haz de ultrasonidos en dirección vertical, el instrumento puede actuar como indicación continua del nivel, midiendo el tiempo de tránsito de un impulso ultrasónico entre la fuente emisora, la superficie del producto donde se refleja y el receptor situado en la propia fuente.

Como la superficie de la mayor parte de los productos sólidos reflejan, en mayor o menor grado, los ultrasonidos, el sistema es adecuado para la mayor parte de los sólidos con mucho polvo, alta humedad, humos o vibraciones, y puede emplearse tanto en materiales opacos como transparentes. Sin embargo, si la superficie del material no es nítida, el sistema es susceptible de dar señales erróneas.

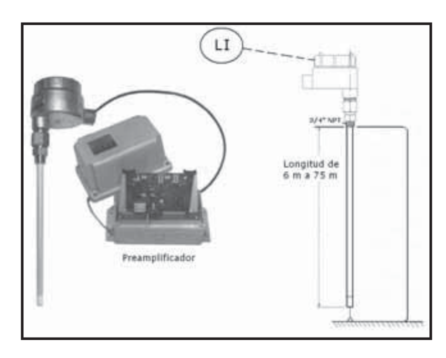


Figura 5.31 Medidor de nivel capacitivo

El uso del ordenador permite resolver este inconveniente al almacenar el perfil ultrasónico del lecho del sólido e interpretarlo para obtener el nivel correcto del sólido. Asimismo, el ordenador proporciona características de autocomprobación (*self-checking*) del instrumento de medida.

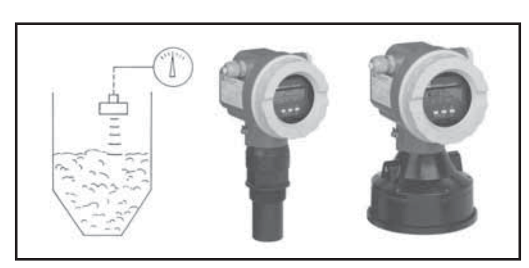


Figura 5.32 Medidor de nivel de ultrasonidos. Fuente: Endress+Hauser

Su exactitud es de, ± 0,15 a, ± 1%, puede construirse a prueba de explosión, pudiendo trabajar a temperaturas de hasta 150 °C.

El *medidor de radar de microondas* (figura 5.33), similar al de nivel de líquidos, consta de una fuente de microondas situada en la parte superior del tanque que emite un haz de microondas que se

refleja sobre el sólido y es captado por un detector. El sistema es ideal en productos muy viscosos como el asfalto. Su exactitud es de ± 2 mm y su campo de medida puede llegar a 40 metros.

El *medidor de nivel de radiación* (figura 5.34) es parecido al instrumento estudiado en la determinación del nivel de líquidos. Consiste en una fuente radiactiva de rayos gamma, dispuesta al exterior y en la parte inferior del tanque, que emite su radiación a través del lecho de sólidos, siendo captada por un detector exterior.



Figura 5.33 Medidor de nivel radar. Fuente: VEGA

El grado de radiación recibida depende del espesor de sólidos que se encuentra entre la fuente y el receptor. La fuente radiactiva y el receptor pueden disponerse también en un plano horizontal, en cuyo caso el aparato trabaja como detector discontinuo todo-nada.

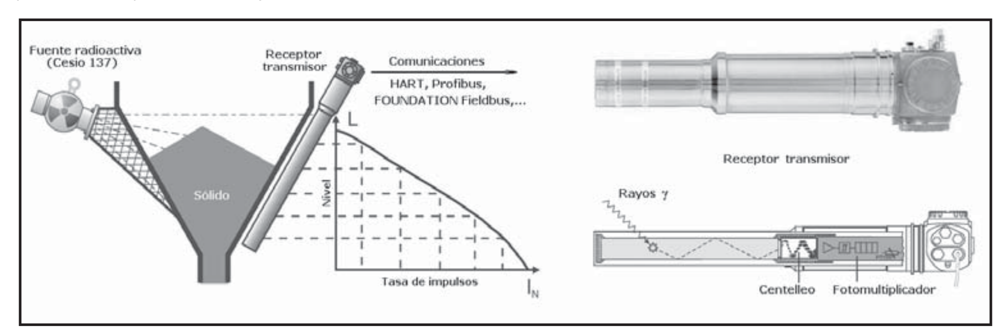


Figura 5.34 Medidor de nivel de radiación. Fuente: Endress+Hauser

El instrumento puede trabajar a altas temperaturas hasta unos 1.300 °C, presiones máximas de 130 bar, en materiales peligrosos o corrosivos, no requiere ninguna abertura o conexión a través del tanque y admite control neumático o electrónico. Sin embargo, es un sistema de coste elevado que necesita una supervisión periódica desde el punto de vista de seguridad, debe calibrarse para cada tanque y no puede aplicarse a materiales a los que afecte la radiactividad.

Su exactitud es del ± 1% y su campo de medida de 0,5 m por cada fuente, pudiendo emplearse varias para aumentar el intervalo de media del nivel.

El *medidor de nivel láser* (figura 5.35) envía impulsos desde el sensor hasta el nivel de sólido y capta el impulso reflejado, calculando la distancia por la multiplicación entre la velocidad de la luz y la mitad del tiempo que ha tardado el haz entre el emisor y el receptor del pulso, después de reflejarse éste en la superficie del sólido. Tiene la ventaja de que no hay dispersión del haz de luz (solo 0,2°), no existen

falsos ecos y el haz puede dirigirse hasta distancias de 75 m y a espacios tan pequeños como 25 cm^2. Su exactitud es del ± 1%.

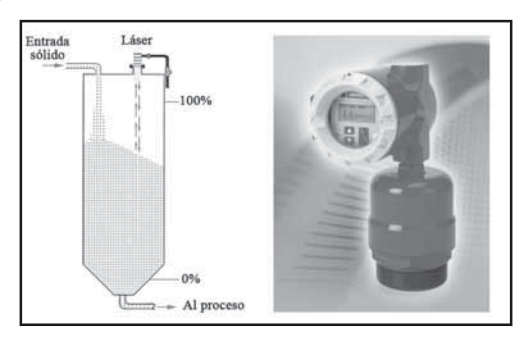


Figura 5.35 *Medidor de nivel láser. Fuente: K-TEK*

En la tabla 5.3 figuran las características principales de los medidores de nivel de sólidos.

Tipo	Punto fijo		Continuo	Exactitud (% escala)	Temperatura máx. servicio, °C	Tanques		Desventajas	Ventajas
	Alto	Bajo				Abiertos	Cerrados		
Diafragma	Si	Si	No	μμ 05 ±	60	Si	Si	No admite materiales granulares > 80 mm. Tanques a baja presión	Bajo coste. Trabaja bien con materiales de variada densidad.
Sonda	Si	No	No	μμ 52 ±	60	Si	No	Debe estar protegido. Solo tanques abiertos.	Bajo coste
Capacitivo (detector proximidad)	Si	No	No	μμ 52 ±	300	Si	No	Adherencias producto	Bajo coste
Paletas rotativas	Si	Si	No	μμ 52 ±	60	Si	No	Tanques abiertos o a baja presión	Materiales diversos. A prueba de explosión.
Vibración	Si	Si	No	%1 ±	60	Si	Si	Tanques abiertos o a baja presión	Variedad de productos pulverulentos
Radar con haz horizontal	Si	Si	No	μμ 2 ±	150	Si	Si	Coste medio	Productos muy viscosos
Sondeo electromecánico	–	–	Si	%1 ±	60	Si	No	Debe ser robusto (resistencia mecánica media)	Sencillo
Báscula o células de carga	–	–	Si	± 0,5 a ± 1%	900	Si	Si	Coste elevado	Exacto y seguro. Altas presiones y temperaturas.
Capacitivo	–	–	Si	± 15 mm	150	Si	Si	Materiales aislantes precisa una calibración individual. Adherencias producto. Lectura influida por las variaciones de densidad del sólido.	Bajo coste
Ultrasónico	Si	Si	Si	± 0,15 a ± 1%	150	Si	Si	Coste medio. Da señales erróneas si la superficie del sólido no es nítida (compensado con el perfil ultrasónico del lecho)	Materiales opacos y transparentes. A prueba de explosión.
Radar	Si	Si	Si	μμ 2 ±	150	Si	Si	Coste medio	Productos muy viscosos
Radiación	Si	Si	Si	± 1%	1300	Si	Si	Coste elevado. Supervisión seguridad. Calibración individual.	Tanque sin aberturas, productos corrosivos y peligrosos, altas presiones y temperaturas.
Laser	Si	Si	Si	± 1%	1300	Si	Si	Coste elevado	Todo tipo de tanques. No hay dispersión del haz de luz. No tiene falsos ecos

Tabla 5.3 Características de los medidores de nivel de sólidos

Capítulo 6
Medida de temperaturas

6.1 Introducción

La medida de la temperatura es una de las más comunes y de las más importantes que se efectúan en los procesos industriales. Casi todos los fenómenos físicos están afectados por ella. La temperatura se utiliza, frecuentemente, para inferir el valor de otras variables del proceso.

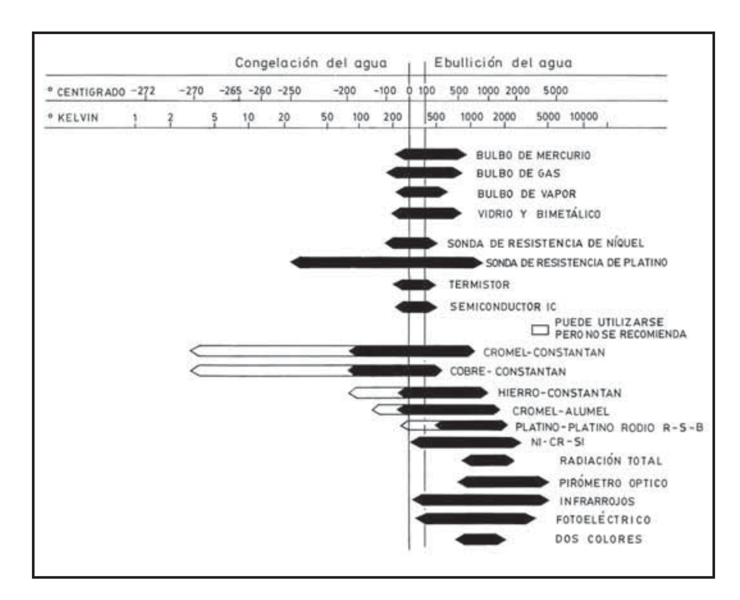


Figura 6.1 Campo de medida de los instrumentos de temperatura

Existen diversos fenómenos que son influidos por la temperatura y que son utilizados para medirla:

a) Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases).
b) Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia).
c) Variación de resistencia de un semiconductor (termistores).
d) La f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares).
e) Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación).
f) Otros fenómenos utilizados en laboratorio (velocidad del sonido en un gas, frecuencia de resonancia de un cristal, etc.).

De este modo, se emplean los siguientes instrumentos: termómetros de vidrio, termómetros bimetálicos, elementos primarios de bulbo y capilar rellenos de líquido, gas o vapor, termómetros de resistencia, termopares, pirómetros de radiación, termómetros ultrasónicos y termómetros de cristal de cuarzo.

6.2 Termómetro de vidrio

El *termómetro de vidrio* consta de un depósito de vidrio que contiene, por ejemplo, mercurio y que al calentarse, se expande y sube en el tubo capilar.



Figura 6.2 Termómetro de vidrio

Los márgenes de trabajo de los fluidos empleados son:

Mercurio	-35 °C hasta +280 °C
Mercurio (tubo capilar lleno de gas)	-35 °C hasta +450 °C
Pentano	-200 °C hasta +20 °C
Alcohol	-110 °C hasta +50 °C
Tolueno	-70 °C hasta +100 °C

6.3 Termómetro bimetálico

Los *termómetros bimetálicos* se fundamentan en el distinto coeficiente de dilatación de dos metales diferentes, tales como latón, monel o acero y una aleación de ferroníquel o Invar (35,5% de níquel) laminados conjuntamente. Las láminas bimetálicas pueden ser rectas o curvas, formando espirales o hélices (figura 6.3)

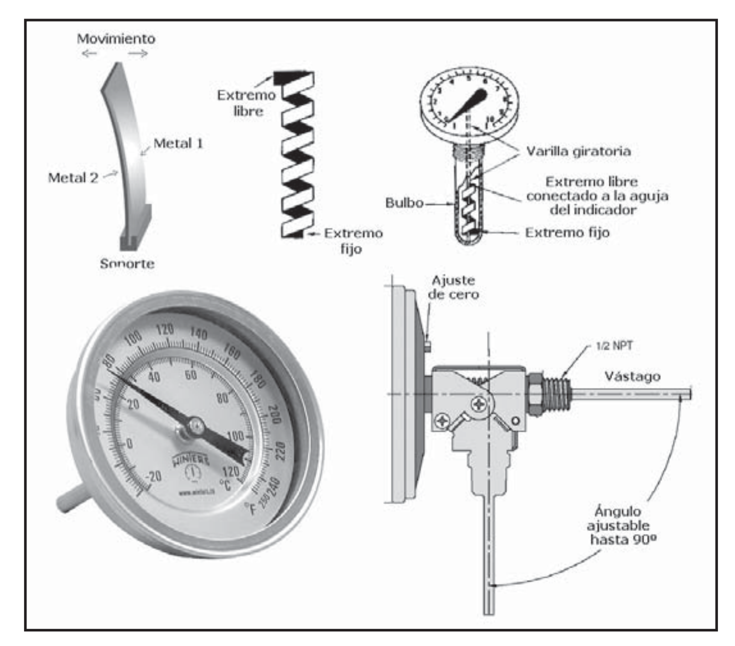


Figura 6.3 Termómetro bimetálico

La relación entre el ángulo de torsión de la lámina bimetálica y la temperatura viene expresada por:

$$\alpha = \frac{360}{\pi} \times \frac{a \times l}{s} \times (t_2 - t_1)$$

con:

a = coeficiente de expansión térmica

l = longitud de la lámina bimetálica

s = espesor de la lámina bimetálica

Un termómetro bimetálico típico contiene pocas parte móviles, sólo la aguja indicadora sujeta al extremo libre de la espiral o hélice y el propio elemento bimetálico. El eje y el elemento están sostenidos con cojinetes, y el conjunto está construido con precisión para evitar rozamientos. No hay engranajes que exijan un mantenimiento.

El uso de termómetros bimetálicos es admisible para servicio continuo de 0 °C a 400 °C. Para indicación local se usan, preferiblemente, los termómetros bimetálicos de esfera orientable. De este modo, el operario puede leer la temperatura a distancia desde niveles distintos, al de la instalación. La exactitud del instrumento es de ± 1% y su campo de medida es de -200 °C a +500 °C.

6.4 Termómetros de bulbo y capilar

Los *termómetros tipo bulbo* y *capilar* consisten, esencialmente, en un bulbo conectado por un capilar a una espiral. Cuando la temperatura del bulbo cambia, el gas o el líquido en el bulbo se expanden y la espiral tiende a desenrollarse, moviendo la aguja sobre la escala para indicar la elevación de la temperatura en el bulbo.

Hay cuatro clases de este tipo de termómetros:

- **Clase I.** Termómetros actuados por líquido
- **Clase II.** Termómetros actuados por vapor
- **Clase III.** Termómetros actuados por gas
- **Clase IV.** Termómetros actuados por mercurio

Los *termómetros actuados por líquido* (clase I) tienen el sistema de medición lleno de líquido y, como su dilatación es proporcional a la temperatura, la escala de medición resulta uniforme. Con capilares cortos de hasta 5 m, y para evitar errores debidos a variaciones de la temperatura ambiente, sólo hay que compensar el elemento de medición (figura 6.4a). En capilares más largos, hay que compensar también el volumen del tubo capilar (figura 6.4b). La presión dentro del bulbo y el tubo capilar debe ser mayor que la presión de vapor del líquido para evitar la formación de burbujas de vapor. Se utiliza como liquido un hidrocarburo inerte, el xileno (C_8H_{10}) y otros líquidos. El campo de medición de temperaturas varía entre -75 °C y 300 °C, dependiendo del tipo de líquido que se emplee.

Los *termómetros actuados por vapor* (clase II) (figura 6.5) se basan en el principio de presión de vapor. Contienen un líquido volátil cuya interfase se encuentra en el bulbo. Al subir la temperatura aumenta la presión de vapor del líquido. La escala de medición no es uniforme, sino que las distancias entre divisiones van aumentando hacia la parte más alta de la escala, donde hay mayor sensibilidad. La presión en el sistema solamente depende de la temperatura en el bulbo, por lo que no hay necesidad de compensar la temperatura ambiente.

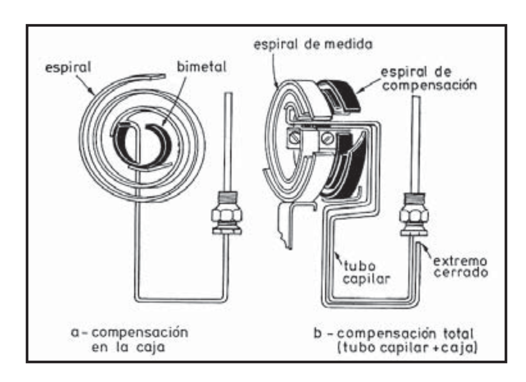


Figura 6.4 *Termómetros actuados por líquido*

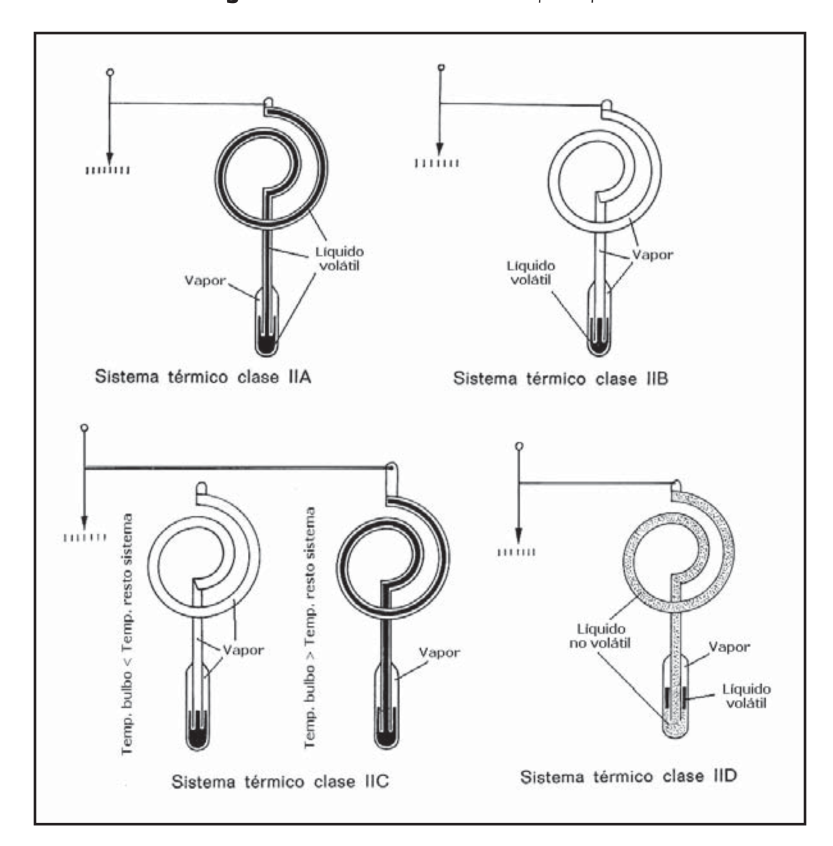


Figura 6.5 *Termómetros actuados por vapor (clase IIA, IIB, IIC y IID)*

Dependiendo de la temperatura, los líquidos que se utilizan son cloruro de metilo, anhídrido sulfuroso, butano, propano, hexano, éter metílico, cloruro de etilo, éter etílico, alcohol etílico y clorobenceno.

La velocidad de respuesta es de 1 a 10 segundos. El campo de medición de temperaturas varía entre -40 °C y 300 °C, dependiendo del tipo de líquido que se emplee.

Si la temperatura del bulbo es mayor que la temperatura ambiente, el bulbo está lleno de vapor, mientras que el capilar y el elemento de medición están llenos de líquido (clase IIA). Los cambios en la temperatura ambiente afectan a la presión de vapor del líquido, siendo necesario corregir la indicación en la diferencia de alturas entre el bulbo y el elemento de medición. Si la temperatura del bulbo es más baja que la ambiente, el bulbo está lleno de líquido y el resto del sistema se llena de vapor (clase IIB).

La clase IIC opera con la temperatura del bulbo superior e inferior a la temperatura ambiente, es decir, como la clase IIA y la clase IIB. La clase IID trabaja con dos líquidos, uno volátil situado en el bulbo y otro no volátil situado en parte del bulbo, el capilar y el tubo Bourdon, cuyo objeto es transmitir la presión de vapor a la interfase líquido volátil/vapor.

Los *termómetros actuados por gas* (clase III) están completamente llenos de gas. Al subir la temperatura, la presión de gas aumenta prácticamente de forma proporcional y, por lo tanto, estos termómetros tienen escalas lineales. La presión en el sistema depende, principalmente, de la temperatura del bulbo, pero también de la temperatura del tubo capilar y del elemento de medición, siendo necesario compensar la temperatura del ambiente en el sistema de medición.

La constante de tiempo de los termómetros de gas es de 1 a 4 segundos. Se utiliza como gas el nitrógeno, que es inerte y barato. A bajas temperaturas se emplea el helio. El campo de medición de temperaturas varía entre -80 °C y 600 °C.

Los *termómetros actuados por mercurio* (clase IV) son similares a los termómetros actuados por líquido (clase I) y se caracterizan por su rápida respuesta, exactitud y potencia de actuación. La presión interna del mercurio varía de 28 bar a bajas temperaturas hasta 80 bar a altas temperaturas, lo que elimina los errores de diferencia de altura entre el bulbo y el tubo Bourdon. El campo de medición de temperaturas varía entre -40 °C y 650 °C. Pueden tener compensación en la caja y compensación total (figura 6.4).

Las escalas están normalizadas según la norma DIN 16.203.

<table>
<tr><th>Escala, ºC</th><th>Separación entre divisiones, ºC</th><th>Límites de error, ºC</th></tr>
<tr><td>-80 a +60</td><td>2</td><td>2</td></tr>
<tr><td>-60 a +40</td><td rowspan="10">1</td><td rowspan="10">1</td></tr>
<tr><td>-40 a +60</td></tr>
<tr><td>-50 a +30</td></tr>
<tr><td>-30 a +50</td></tr>
<tr><td>-0 a +60</td></tr>
<tr><td>-20 a +80</td></tr>
<tr><td>0 a 60</td></tr>
<tr><td>0 a 80</td></tr>
<tr><td>0 a 100</td></tr>
<tr><td>0 a 120</td></tr>
<tr><td>0 a 160</td><td rowspan="2">2</td><td rowspan="2">2</td></tr>
<tr><td>0 a 200</td></tr>
<tr><td>0 a 250</td><td rowspan="2">5</td><td>2,5</td></tr>
<tr><td>0 a 300</td><td>5</td></tr>
</table>

Tabla 6.1 Escalas de temperatura según DIN 16.203 (clase I)

6.5 Termómetros de resistencia

La medida de temperatura utilizando sondas de resistencia depende de la variación de resistencia en función de la temperatura, que es propia del elemento de detección.

El elemento consiste, usualmente, en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica.

El material que forma el conductor se caracteriza por el llamado "*coeficiente de temperatura de resistencia*" que expresa, a una temperatura especificada, la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura.

La relación entre estos factores puede verse en la siguiente expresión lineal:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

en la que:

R_0 = resistencia en ohmios a 0 °C

R_t = resistencia en ohmios a t °C

α = coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0 °C y 100 °C es de 0,003850 Ω / (Ω / °C) en la Escala Práctica de Temperaturas Internacional (IPTS-68)

Esta relación presenta una diferencia en la resistencia en ohioms entre R_t y la resistencia real de la sonda, según puede verse en la figura 6.6.

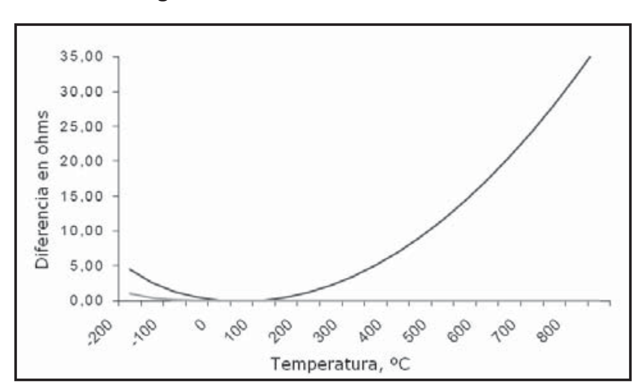


Figura 6.6 Relación entre el valor real de la resistencia y el obtenido por la fórmula $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$. Curva de color gris claro = temperatura < 0 °C

Como la relación resistencia-temperatura no es lineal, la ecuación general, según IEC751, pasa a:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \qquad (1)$$

válida de -200 °C a 0 °C, y:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^3] \qquad (2)$$

válida de 0 °C a 850 °C;

en la que A, B, C son coeficientes de temperatura de la resistencia de valores:

$A = 3,90802 \times 10^{-3}$

B = -5,802 × 10^{-7}

C = -4,27350 × 10^{-12}

El método Callendar - Van Dussen se utiliza cuando se desea una alta exactitud para una sonda particular, en medidas realizadas en metrología o en el laboratorio. Se basa en la medición de la resistencia de la sonda a 4 temperatura conocidas:

R_0 a la temperatura de 0 °C (punto de congelación del agua)

R_{100} a la temperatura de 100 °C (punto de ebullición del agua)

R_h a la temperatura alta t_h (punto de solidificación del zinc 419,53 °C)

R_l a la temperatura t_l (punto de ebullición del oxígeno -182,96 °C)

El coeficiente α se determina por la fórmula:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 - R_0}$$

Y, si esta aproximación es suficiente, se utiliza la expresión:

$$R_t = R_0 + R_0\alpha \times t$$

$$t = \frac{R_t - R_0}{R_0 \times \alpha}$$

Callendar introduce un término de 2º orden δ basado en la disparidad entre la temperatura real t_h y la temperatura calculada t. Y así, para t > 0 °C:

$$\delta = \frac{t_h - \dfrac{R_{th} - R_0}{R_0 \times \alpha}}{\left(\dfrac{t_h}{100} - 1\right) \times \left(\dfrac{t_h}{100}\right)}$$

$$R_t = R_0 + R_0 \times \alpha \left[t - \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \times \left(\frac{t}{100} \right) \right]$$

Para temperaturas negativas (t < 0 °C) se usa el coeficiente β (curva en gris de la figura 6.6).

$$\beta = \frac{t_l - \left[\dfrac{R_{tl} - R_0}{R_0\alpha} + \delta \left(\dfrac{t_l}{100} - 1 \right) \times \left(\dfrac{t}{100} \right) \right]}{\left(\dfrac{t_l}{100} - 1 \right) \times \left(\dfrac{t_l}{100} \right)^3}$$

Y así, la fórmula general, considerando que para t > 0 °C, β = 0:

$$R_t = R_0 + R_0\alpha \left[t - \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right)\left(\frac{t}{100} \right) - \beta \left(\frac{t}{100} - 1 \right)\left(\frac{t}{100} \right)^3 \right] \qquad (3)$$

A partir de esta expresión pueden obtenerse los valores de A, B y C.

La expresión general (1), válida de -200 °C a 0 °C, pasa a:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 - 100Ct^3 + Ct^4] \quad (4)$$

Y, por comparación con la expresión (3), resulta:

$$A = \alpha + \frac{\alpha \times \delta}{100}$$

$$B = -\frac{\alpha \times \delta}{10.000}$$

$$C = -\frac{\alpha \times \beta}{1.000.000}$$

La tabla 6.2 indica algunos valores de estos coeficientes.

Coeficientes de la sonda de resistencia Pt100 (IEC751 y ITS90)			
α	0,00385	A	$3,908 \times 10^{-3}$
δ	1,4999	B	$-5,775 \times 10^{-7}$
β	0,10863	C	$-4,183 \times 10^{-12}$

Tabla 6.2 Coeficientes de la sonda de resistencia Pt100 (IEC751 y ITS90)

Algunas compañías han desarrollado un software para calcular con exactitud los valores de resistencia de la sonda en función de la temperatura. Por ejemplo, Burns Engineering con su programa *Dincalc* basado en el valor del coeficiente de temperatura de la sonda de resistencia de Pt100 de 0,003850 Ω / (Ω / °C) en la Escala Práctica de Temperaturas Internacional (IPTS-68).

En Estados Unidos, la especificación de ASTM E1137 "*Standards Specification for Industrial Platinum Resistance Thermometers* - Especificaciones estándar para los termómetros de resistencia de platino" define dos clases de sondas de resistencia de platino.

Clase A - $Tolerancia = \pm[0,13 + 0,0017 \times |t|\ ºC]$

Clase B - $Tolerancia = \pm[0,25 + 0,0042 \times |t|\ ºC]$

Los valores de aceptación de los valores de las sondas (tolerancias) en Europa, son según la norma DIN IEC 751 (*International Electrotechnical Commission* 1983):

Clase A - $Tolerancia = \pm[0,15 + 0,002 \times |t|\ ºC]$

Clase B - $Tolerancia = \pm[0,305 + 0,005 \times |t|\ ºC]$

Donde $|t|$ es el valor absoluto de la temperatura en °C.

En la tabla 6.3 pueden verse algunos valores de aceptación de las sondas (tolerancias) de Pt100, según IEC751.

Los materiales que forman el conductor de la resistencia deben poseer las siguientes características:

- Alto coeficiente de temperatura de la resistencia, ya que de este modo el instrumento de medida será muy sensible.
- Alta resistividad, ya que cuanto mayor sea la resistencia a una temperatura dada tanto mayor será la variación por grado (mayor sensibilidad).

- Relación lineal resistencia-temperatura.
- Rigidez y ductilidad, lo que permite realizar los procesos de fabricación de estirado y arrollamiento del conductor en las bobinas de la sonda, a fin de obtener tamaños pequeños (rapidez de respuesta).
- Estabilidad de las características durante la vida útil del material.

Clasificación y tolerancias de las sondas de resistencia de 100 Ohm (IEC751)				
Temperatura ºC	Grado A		Grado B	
	ºC	Ohms	ºC	Ohms
-200	0,55	0,24	1,3	0,56
-100	0,35	0,14	0,8	0,32
0	0,15	0,06	0,3	0,12
100	0,35	0,13	0,8	0,3
200	0,55	0,2	1,3	0,48
300	0,75	0,27	1,8	0,64
400	0,95	0,33	2,3	0,79
500	1,15	0,38	2,8	0,93
600	1,35	0,43	3,3	1,06
650	1,45	0,46	3,6	1,13
700	-	-	3,8	1,17
800	-	-	4,3	1,28
850	-	-	4,6	1,34

Tabla 6.3 *Clasificación y tolerancias de las sondas de resistencia IEC751*

En la figura 6.7 pueden verse las curvas de resistencia relativa de varios metales en función de la temperatura, y en la tabla 6.4 se indican sus características (platino, cobre, níquel y níquel-hierro).

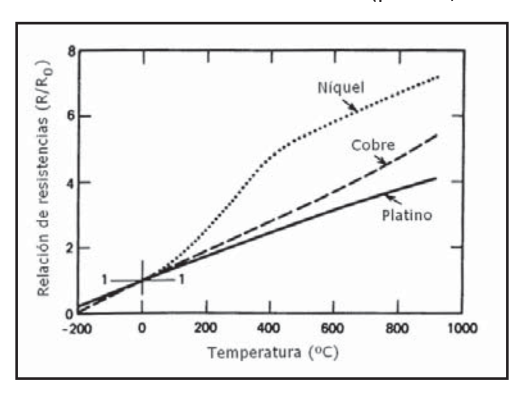


Figura 6.7 *Curvas de resistencia relativa de varios metales/temperatura*

En general, la sonda de resistencia de platino utilizada en la industria tiene una resistencia de 100 ohmios a 0 °C. Las formas de los elementos de platino son de bobina (figura 6.8a) y de película metálica de platino (figura 6.8b). El sensor de película metálica es de pequeño tamaño y responde, rápidamente, a las variaciones de temperatura. Sus características resistencia-temperatura son similares a las de los sensores de bobina.

Características de sondas de resistencia						
Elemento	Intervalo útil de temperaturas, ºC	Resistencia básica	Sensibilidad (Ω/ºC de 0º a 100 ºC)	Coeficiente, Ω/Ω x ºC	Ventajas	Desventajas
Platino	-260 a 850 ºC (-436 a 1562 ºF)	100 Ω a 0 ºC 1000 Ω a 0 ºC	0,39 3,90	0,0375 a 0,003927	Mayor intervalo Mejor estabilidad Buena linealidad	Coste
Cobre	-100 a 260 ºC (-148 a 500 ºF)	10 Ω a 25 ºC	0,04	0,00427	Buena linealidad	Baja resistividad
Níquel	-100 a 260 ºC (-148 a 500 ºF)	100 Ω a 0 ºC 120 Ω a 0 ºC	0,62 0,81	0,00618 a 0,00672	Bajo coste Alta sensibilidad	Falta de linealidad, variaciones coeficiente de resistencia
Níquel-Hierro	-100 a 204 ºC (-148 a 400 ºF)	604 Ω a 0 ºC 1000 Ω a 70 ºF 1000 Ω a 70 ºF	3,13 4,79 9,58	0,00518 a 0,00527	Bajo coste Muy alta sensibilidad	Relación reducida R_{100}/R_0

Tabla 6.4 Características de sondas de resistencia

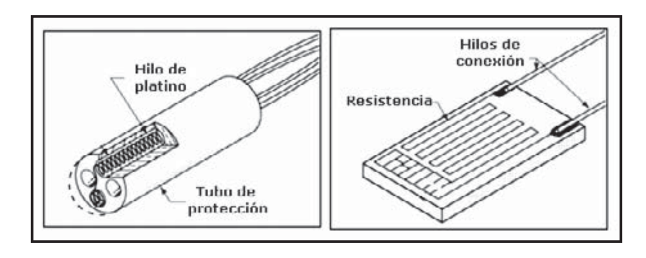


Figura 6.8 Elementos de sondas de resistencia de platino (bobina y sustrato de película metálica)

En la tabla 6.5 pueden verse los valores de resistencia de las sondas de Pt100. A señalar que la misma tabla es válida para termorresistencias Pt500 (500 ohmios a 0 °C) y Pt1000 (1.000 ohmios a 0 °C) multiplicando los valores correspondientes por 5 y por 10, respectivamente.

Las bobinas que llevan arrollado el hilo de resistencia están encapsuladas y situadas dentro de un tubo de protección o vaina de material adecuado al fluido del proceso (acero, acero inox. 304, acero inox. 316, hastelloy, monel, etc.).

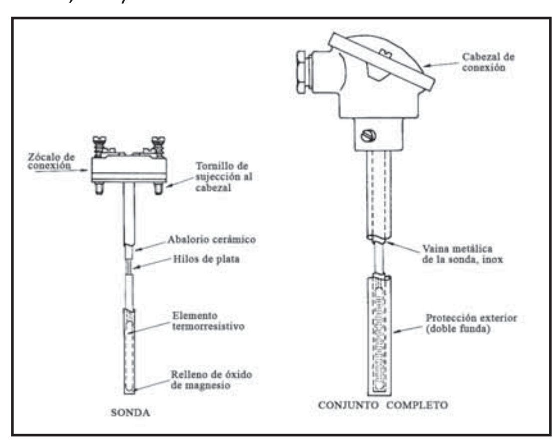


Figura 6.9 Partes de una termoresistencia

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Resistencia en ohmios									
−220	10,408									
−210	14,360	13,951	13,546	13,145	12,746	12,350	11,955	11,565	11,177	10,793
−200	18,530	18,109	17,689	17,268	16,849	16,429	16,012	15,595	15,182	14,769
−190	22,782	22,354	21,928	21,501	21,073	20,646	20,221	19,796	19,373	18,950
−180	27,049	26,623	26,197	25,771	25,345	24,918	24,492	24,064	23,637	23,209
−170	31,280	30,859	30,437	30,015	29,592	29,169	28,746	28,322	27,989	27,473
−160	35,478	35,060	34,641	34,222	33,803	33,383	32,963	32,543	32,122	31,701
−150	39,651	39,234	38,818	38,401	37,984	37,567	37,150	36,732	36,315	35,897
−140	43,802	43,387	42,973	42,559	42,144	41,729	41,314	40,898	40,483	40,067
−130	47,932	47,520	47,107	46,695	46,282	45,869	45,456	45,043	44,629	44,215
−120	52,041	51,631	51,221	50,811	50,400	49,989	49,578	49,167	48,755	48,344
−110	56,131	55,722	55,314	54,906	54,497	54,088	53,679	53,270	52,861	52,451
−100	60,201	59,794	59,388	58,982	58,575	58,168	57,761	57,354	56,946	56,538
−90	64,252	63,847	63,443	63,083	62,634	62,229	61,823	61,418	61,012	60,607
−80	68,282	67,880	67,478	67,075	66,673	66,270	65,866	65,463	65,059	64,656
−70	72,291	71,892	71,419	71,091	70,690	70,290	69,889	69,487	69,086	68,684
−60	76,279	75,882	75,483	75,085	74,687	74,288	73,889	73,490	73,091	72,691
−50	80,250	79,854	79,457	79,061	78,664	78,267	77,870	77,472	77,075	76,677
−40	84,212	83,816	83,420	83,024	82,628	82,232	81,836	81,439	81,043	80,647
−30	88,170	87,774	87,378	86,983	86,587	86,191	85,745	85,399	85,003	84,607
−20	92,127	91,731	91,336	90,940	90,545	90,149	89,753	89,357	88,962	88,566
−10	96,072	95,679	95,285	94,891	94,496	94,102	93,707	93,312	92,917	92,522
0	100,000	99,608	99,216	98,823	98,431	98,038	97,645	97,253	96,859	96,466
0	100,000	100,391	100,781	101,172	101,562	101,952	102,343	102,733	103,123	103,512
10	103,902	104,292	104,681	105,070	105,460	105,894	106,238	106,627	107,015	107,404
20	107,793	108,181	108,569	108,957	109,345	109,733	110,121	110,509	110,897	111,284
30	111,671	112,059	112,446	112,833	113,220	113,607	113,993	114,380	114,766	115,153
40	115,539	115,925	116,311	116,697	117,083	117,468	117,854	118,239	118,624	119,010
50	119,395	119,780	120,164	120,549	120,934	121,318	121,702	122,087	122,471	122,855
60	123,239	123,623	124,006	124,390	124,773	125,157	125,540	125,923	126,306	126,689
70	127,071	127,454	127,837	128,219	128,601	128,983	129,365	129,747	130,129	130,511
80	130,893	131,275	131,656	132,037	132,418	132,809	133,180	133,560	133,941	134,321
90	134,702	135,082	135,463	135,843	136,223	136,602	136,982	136,362	137,741	138,121
100	138,500	138,879	139,258	139,637	140,016	140,395	140,773	141,152	141,530	141,908
110	142,286	142,664	143,042	143,420	143,798	144,175	144,553	144,930	145,307	145,684
120	146,061	146,438	146,815	147,191	147,568	147,944	148,320	148,697	149,073	149,449
130	149,824	150,200	150,576	150,951	151,326	151,702	152,077	152,452	152,827	153,201
140	153,576	153,951	154,523	154,699	155,075	155,448	155,822	156,195	156,569	156,943
150	157,316	157,690	158,063	158,436	158,809	159,182	159,555	159,927	160,300	160,672
160	161,045	161,417	161,785	162,161	162,353	162,905	163,276	153,648	164,019	164,391
170	164,762	165,133	165,504	165,875	166,245	166,616	166,986	167,357	167,727	168,097
180	168,467	168,837	169,209	169,576	169,946	170,315	170,685	171,054	171,423	171,792
190	172,161	172,530	172,898	173,267	173,625	174,003	174,372	174,740	175,108	175,475
200	175,843	176,211	176,578	176,946	177,313	177,689	178,047	178,414	178,781	179,147
210	179,514	179,880	180,247	180,613	180,979	181,345	181,711	182,076	182,442	182,808
220	183,173	183,538	183,903	184,268	184,633	184,998	185,363	185,727	186,092	186,456
230	186,821	187,185	187,549	187,913	188,276	188,640	189,004	189,367	189,730	190,093
240	190,457	190,819	191,182	191,545	191,908	192,270	192,633	192,995	193,357	193,719
250	194,081	194,443	194,804	195,166	195,527	195,889	196,250	196,611	196,972	197,333
260	197,694	198,054	198,415	198,775	199,136	199,496	199,856	200,016	200,576	200,935
270	201,295	201,655	202,014	202,373	202,732	203,091	203,450	203,809	204,168	204,526
280	204,885	205,243	205,601	205,959	206,317	206,675	207,033	207,391	207,748	208,106
290	208,463	208,820	209,177	209,534	209,891	210,248	210,604	210,961	211,317	211,673
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Tabla 6.5 Valores de resistencia según la temperatura en ºC para las sondas de resistencia Pt100, con coeficiente de variación de resistencia 0,00385 según DIN 43.760 (IPTS-68)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Resistencia en ohmios									
300	212,030	212,386	212,741	213,097	213,453	213,808	214,164	214,519	214,874	215,230
310	215,585	215,939	216,294	216,649	217,003	217,358	217,712	218,066	218,429	218,774
320	219,128	219,482	219,835	220,189	220,542	220,895	220,248	221,602	221,954	222,307
330	222,660	223,012	223,365	223,171	224,009	224,421	224,773	225,125	225,477	225,829
340	226,180	226,532	226,883	227,234	227,585	227,936	228,267	228,638	228,988	229,339
350	229,689	230,039	230,389	230,739	231,089	231,439	231,789	232,138	232,488	232,837
360	233,689	233,535	233,884	234,233	234,582	234,930	235,279	235,627	235,975	236,324
370	236,672	237,020	237,367	237,715	238,063	238,410	238,757	239,105	239,452	239,799
380	240,146	240,492	240,839	241,186	241,532	241,878	241,225	242,571	242,917	243,262
390	243,608	243,954	244,299	244,645	244,990	245,335	245,680	246,025	246,370	246,715
400	247,059	247,404	247,748	248,092	248,436	248,780	249,124	249,468	249,811	250,155
410	250,498	250,842	251,185	251,528	251,871	253,214	252,556	252,899	253,242	253,584
420	253,926	254,268	254,610	254,952	255,294	255,636	255,977	256,319	256,660	257,001
430	257,342	257,683	258,024	258,365	258,706	259,046	259,387	259,727	260,067	260,407
440	260,747	261,087	261,427	261,766	262,106	262,445	262,784	263,123	263,462	263,801
450	264,140	264,479	264,817	265,156	265,494	265,832	266,170	266,508	266,846	267,184
460	267,522	267,859	268,196	268,534	268,871	269,208	269,545	269,882	270,218	270,555
470	270,891	271,228	271,564	271,900	272,236	272,572	272,908	273,244	273,579	273,914
480	274,250	274,585	274,920	275,255	275,590	275,925	276,259	276,594	276,928	277,262
490	277,597	277,931	278,265	278,598	278,932	279,266	279,599	279,932	280,266	280,599
500	280,932	281,265	281,597	281,930	282,263	282,595	282,927	283,260	283,592	283,924
510	284,255	284,587	284,919	285,250	285,582	285,913	286,244	286,575	286,906	287,237
520	287,568	287,898	288,229	288,559	288,889	289,219	289,549	289,879	290,209	290,539
530	290,868	291,198	291,527	291,856	292,185	292,514	292,843	293,172	293,500	293,829
540	294,157	294,485	294,813	295,141	295,469	295,797	296,125	296,452	296,780	297,107
550	297,434	297,761	297,089	298,415	298,742	299,069	299,395	299,722	300,048	300,374
560	300,700	301,026	301,352	301,678	302,003	302,329	302,979	303,304	303,630	
570	303,954	304,279	304,604	304,928	305,253	305,577	305,901	306,226	305,549	306,673
580	307,197	307,512	307,844	308,168	308,491	308,814	309,137	309,460	309,783	310,106
590	310,428	310,751	311,073	311,395	311,717	312,039	312,361	312,683	313,005	313,326
600	313,648	313,969	314,290	314,611	314;932	315,253	315,574	315,895	316,215	316,535
610	316,856	317,176	317,496	317,816	318,136	318,455	318,775	319,094	319,414	319,733
620	320,052	320,371	320,690	321,009	321,327	321,646	321,964	322,283	322,601	322,919
630	323,237	323,555	323,873	324,190	324,508	324,825	325,142	325,459	325,776	326,093
640	326,410	326,727	327,043	327,360	327,676	327,992	328,309	328,625	328,940	329,256
650	329,572	329,887	330,203	330,518	330,833	331,148	331,463	331,778	332,093	332,408
660	332,722	333,036	333,351	333,665	333,979	334,293	334,607	334,920	335,234	335,547
670	335,861	336,174	336,487	336,800	337,113	337,426	337,738	338,051	338,363	338,675
680	338,988	339,300	339,612	339,923	340,235	340,547	340,858	341,170	341,481	341,792
690	342,103	342,414	342,725	343,035	343,346	343,656	343,967	344,277	344,587	344,897
700	345,207	345,517	345,826	346,136	346,445	346,754	347,064	347,373	347,682	347,990
710	348,299	348,608	348,916	349,225	349,533	349,841	350,149	350,457	350,765	351,072
720	351,380	351,687	351,995	352,302	352,609	352,916	353,223	353,529	353,836	354,143
730	354,449	354,755	355,061	355,367	355,673	355,979	356,285	356,591	356,896	357,201
740	357,507	357,812	358,117	358,422	358,726	359,031	359,336	359,640	359,944	360,249
750	360,553	360,857	361,160	361,464	361,768	362,071	362,375	362,678	362,981	363,284
760	363,587	363,890	364,193	364,495	364,798	365,100	365,402	365,704	366,006	366,308
770	366,610	366,912	367,213	367,515	367,816	368,117	368,418	368,719	369,020	369,321
780	369,621	369,922	370,222	370,522	370,823	371,123	371,422	371,722	372,022	372,322
790	372,621	372,920	373,220	373,519	373,818	374,116	374,415	374,714	375,013	375,311
800	375,609	375,907	376,205	376,503	376,801	377,099	377,296	377,694	377,991	378,289
810	378,586	378,883	379,180	379,477	379,773	380,070	380,366	380,662	380,959	381,255
820	381,551	381,847	382,143	382,438	382,734	383,029	383,324	383,620	383,914	384,209
830	384,504	384,799	385,094	385,388	385,682	385,977	386,271	386,565	386,859	387,153
840	387,446	387,740	388,033	388,327	388,620	388,913	389,206	389,499	389,791	390,084
850	390,377									
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Tabla 6.5 continuación Valores de resistencia según la temperatura en ºC para las sondas de resistencia Pt100, con coeficiente de variación de resistencia 0,00385 según DIN 43.760 (IPTS-68)

En la figura 6.9 pueden verse las partes de una sonda de resistencia y en la figura 6.10 varios tipos de sondas con algunas conexiones al proceso (racord fijo es la forma más usual).

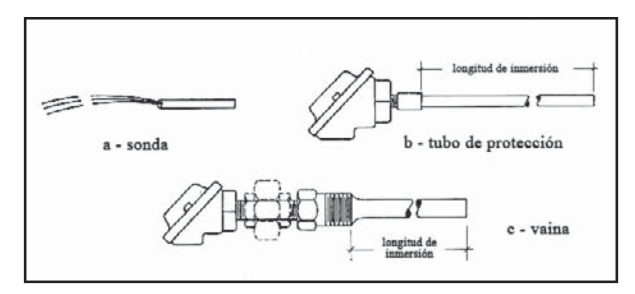


Figura 6.10 Tipos de sondas y conexiones

La forma más simple de medir la temperatura del proceso, mediante una sonda de resistencia, es hacer pasar una corriente por la sonda, lo que dará lugar a una caída de tensión. Se disipa calor en la sonda y su calentamiento aumenta la resistencia. Además, las resistencias de conexión entre el polímetro y la sonda alteran la medida de la resistencia de la sonda (figura 6.11).

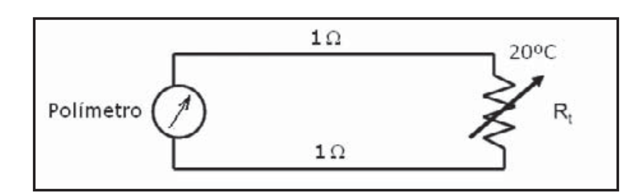


Figura 6.11 Método simple de medir la temperatura del proceso con una sonda de resistencia.

Por ejemplo, en el caso de que cada hilo de conexión a la sonda de resistencia tiene 1 Ω y la temperatura de la sonda es de 20 °C (107,793 Ω).

$$R_t = R_0 \times (1 + \alpha t)$$

$$107,793 + 2 = 100 \times (1 + 0,00385 \times t)$$

Luego:

$$t = \frac{1,09793 - 1}{0,00385} = 25,43\,^{o}C$$

Y el error es de 25,43 - 20 = 5,43 °C.

Las sondas de resistencia se conectan a puentes de Wheatstone convencionales o a otros circuitos digitales de medida de resistencia.

Un puente de Wheatstone consiste en un rectángulo formado por resistencias (o capacidades) cuyos extremos opuestos están conectados, uno a una fuente de tensión constante y el otro a un galvanómetro. Cuando por variación de una resistencia (la que está en contacto con el proceso), el galvanómetro detecta corriente nula, se dice que el puente está equilibrado.

El puente de Wheatstone está dispuesto en montajes denominados de dos hilos, de tres hilos o de cuatro hilos, según sean los hilos de conexión de la sonda de resistencia al puente.

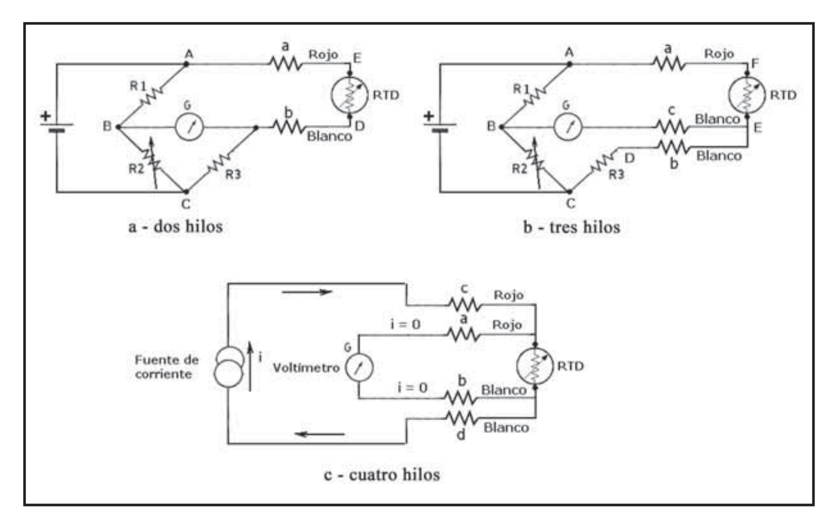


Figura 6.12 *Tipos de circuitos de puente de Wheatstone a sondas de resistencia. Código de colores del hilo s/BS1904:1984*

En el *montaje de dos hilos* (figura 6.12a), la sonda de resistencia (RTD) se conecta a uno de los brazos del puente y se varía $R2$ hasta que se anula la desviación del galvanómetro. En este instante, se cumple la ecuación:

$$\frac{R1}{R3} = \frac{R2}{RTD + K \times (a+b)}$$

con:

RTD = valor resistencia desconocida

K = coeficiente de resistencia por unidad de longitud

a, b = longitudes de los hilos de conexión de la sonda al puente.

Es el montaje más sencillo, pero presenta el inconveniente de que la resistencia de los hilos a y b de conexión de la sonda al puente varía cuando cambia la temperatura, y esta variación falsea, por lo tanto, la indicación; aunque estos hilos sean de baja resistencia (gran diámetro) y ésta sea conocida, las longitudes que puede haber en campo entre la sonda y el panel donde esté el instrumento receptor añaden una cierta resistencia al brazo de la sonda.

Por ejemplo, conectando la sonda al puente de Wheatstone con 30 m de hilo de cobre de 12 AWG de 0,0525 ohm/m, se tiene un error aproximado de:

$$\frac{2 \times 30 \times 0,0525\ \Omega}{0,385\ \Omega/^{o}C} = 8,2\ ^{o}C$$

Para reducir el error pueden utilizarse hilos más gruesos o bien sondas de resistencia de mayor sensibilidad (1.000 Ω en lugar de 100 Ω).

El montaje de dos hilos se emplea, pues, con resistencias moderadas del hilo de conexión y cuando la lectura no necesita ser demasiado exacta.

En el *montaje de tres hilos* (figura 6.12b) la sonda está conectada mediante tres hilos al puente. De este modo, la medida no es afectada por la longitud de los conductores ni por la temperatura, ya que ésta influye a la vez en dos brazos adyacentes del puente, siendo la única condición que la resistencia de los hilos a y b sea exactamente la misma.

En efecto, en la figura puede verse que la ecuación correspondiente es:

$$\frac{R1}{R3+Kb}=\frac{R2}{RTD+Ka}$$

y, como $Ka = Kb$, haciendo $R2/R1 = 1$, resulta $RTD = R3$.

El voltaje en el galvanómetro es:

$$V_0 = V_s \times \left(\frac{R3}{R3+RTD} \right) - V_s \times \frac{1}{2}$$

Si $R_g = R3$, $V_0 = 0$ el puente está equilibrado, y:

$$RTD = R3 \times \left(\frac{V_s - 2V_0}{V_s + 2V_0} \right)$$

Si la sonda de resistencia está situada a una cierta distancia del puente, la resistencia de la línea es la suma de $R3$ y RTD. Luego:

$$RTD = R3 \times \left(\frac{V_s - 2V_0}{V_s + 2V_0} \right) - R_L \times \left(\frac{4V_0}{V_s + 2V} \right)$$

Suponiendo que la resistencia del sensor es RTD = 200 ohmios (267 °C), que el puente está proyectado para 100 ohmios, ($R3$ = 100 ohmios), que el voltaje de la fuente es V_s = 6 V, que la tensión en el punto B es 3 V y que la tensión en el punto E es 2,0066 V, resulta:

$$RTD = R3 \times \left(\frac{V_s - 2V_0}{V_s + 2V_0} \right) = 100 \times \left(\frac{6 - 2 \times (3 - 2,0066)}{6 + 2 \times (3 - 2,0066)} \right) = 199,01\, ohmios$$

Y el error es de 200 - 199,01 = 0,99 ohmios, que corresponde a 2,5 °C (tablas de resistencia - temperatura en la zona de 200 °C). Luego, la resistencia de los cables introduce un error en la medida de la temperatura.

En el *montaje de cuatro hilos* (figura 6.12c) el puente se alimenta con una fuente de corriente constante, de modo que, independientemente de la resistencia de los hilos de conexión, la misma corriente circula por el detector. Las resistencias del puente son elevadas, con lo cual la corriente que circula por los brazos del puente es despreciable y se obtiene la máxima exactitud. El voltímetro indica la resistencia de la sonda y, por lo tanto, la temperatura del proceso.

En la tabla 6.6 puede verse una guía de materiales de aislamiento según las temperaturas del proceso.

La medición automática clásica de la resistencia y, por lo tanto, de la temperatura se lleva a cabo mediante instrumentos autoequilibrados que utilizan un circuito de *puente de Wheatstone* o bien un *puente de capacidades* (figura 6.13).

Material de aislamiento	Intervalo útil de temperaturas	Observaciones
PVC	-10 °C a 105 °C	Buen aislamiento para entornos ligeros. Muy flexible y a prueba de agua.
PTFE	-75 °C a 250/300 °C	Resistente a aceites, ácidos y otros. Buena resistencia mecánica y flexibilidad.
Fibra de vidrio (barnizada)	-60 °C a 350/400 °C	No es impermeable a los fluidos. No ofrece una buena protección mecánica.
Fibra de vidrio (barnizada) de alta temperatura	-60 °C a 700 °C	Soporta temperaturas hasta 700 ºC, pero no es impermeable a los fluidos. Bastante flexible pero no ofrece buena protección contra agentes físicos.
Fibra de cerámica	0 ºC a 1000 ºC	Soporta altas tewmperaturas hasta 1.000 ºC. No protege contra fluidos o agentes físicos.
Fibra de vidrio con acero inoxidable protegido	-60 °C a 350/400 °C	Buena resistencia a los agentes físicos y a la alta temperatura (hasta 400 ºC). No protege contra la entrada de fluidos.

Tabla 6.6 *Materiales de aislamiento según las temperaturas del proceso.*

En ambos casos, un motor de equilibrio es excitado siempre que el puente esté desequilibrado, de tal modo que el instrumento está marcando continuamente la temperatura del proceso.

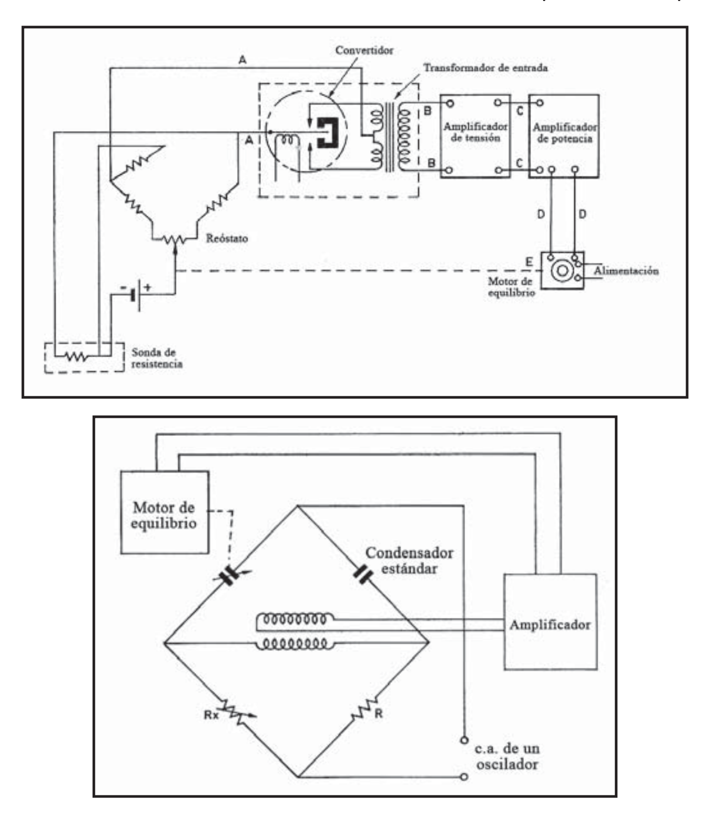


Figura 6.13 *Puente de Wheatstone y puente de capacidades para sonda de resistencia*

La adición de un convertidor o transductor permite obtener una tensión proporcional a la resistencia, que puede amplificarse. Añadiendo transmisión de datos vía bus se obtiene un "transmisor inteligente" con la posibilidad del cambio automático del sensor o del campo de medida, la obtención por hardware o por software de diferentes características, etc.

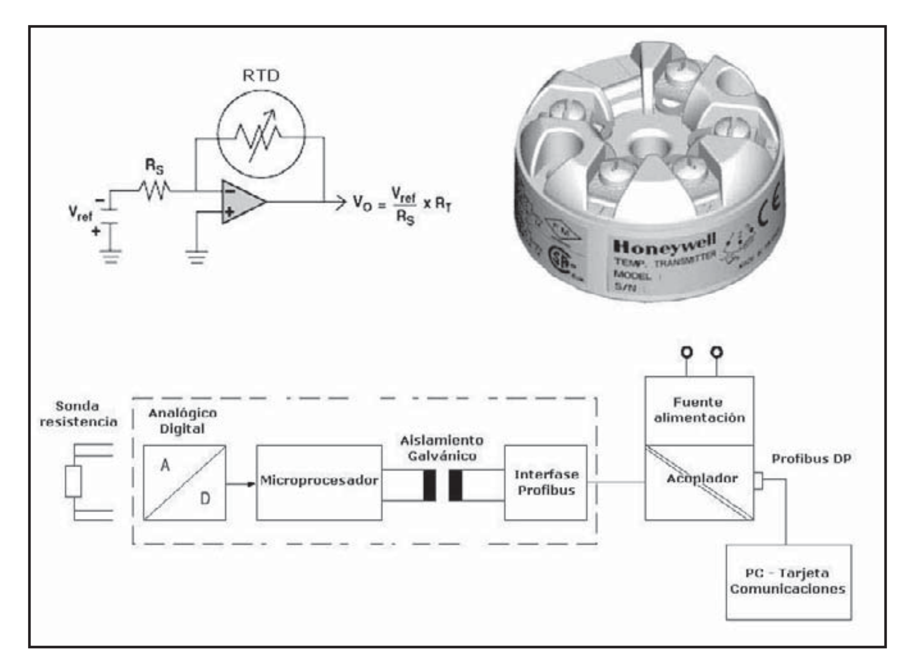


Figura 6.14 Convertidor de temperatura de sonda de resistencia (Fuente: Honeywell)

La exactitud de las sondas de resistencia con transmisor inteligente es de 0,5 °C, o 0,1% del *span*, y su deriva de 0,1 °C/año. La estabilidad es de 0,2 °C después de 10.000 horas de máxima temperatura.

Los materiales que se usan normalmente en las sondas de resistencia son el platino y el níquel.

Para temperaturas criogénicas, la sonda de resistencia de germanio puede trabajar entre 0,05 y 100 °K (grados Kelvin = -272,95 °C y -173 °C) con una resistencia de 10.000 ohms para 1 °K (-272 °C), una sensibilidad de 35.000 ohmios/°K a 4,2 °K y un coeficiente de resistencia negativo (a más temperatura menos resistencia). Sin embargo, su relación resistencia-temperatura es compleja y requiere calibración en muchos puntos.

6.6 Termistores

Los *termistores* son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia negativo de valor elevado, por lo que presentan unas variaciones rápidas, y extremadamente grandes, para los cambios, relativamente pequeños, en la temperatura. Los termistores se fabrican con óxidos de níquel, manganeso, hierro, cobalto, cobre, magnesio, titanio y otros metales, y están encapsulados en sondas y en discos.

Los termistores también se denominan NTC (*Negative Temperature Coeficient* - coeficiente de temperatura negativo) existiendo casos especiales de coeficiente positivo cuando su resistencia aumenta con la temperatura (PTC - *Positive Temperature Coeficient*).

La relación entre la resistencia del termistor y la temperatura viene dada por la expresión.

$$R_t = R_0 e^{\beta\left(\frac{1}{T_t} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

en la que:

R_t = resistencia en ohmios a la temperatura absoluta T_t

R_0 = resistencia en ohmios a la temperatura absoluta de referencia T_0

β = constante dentro de un intervalo moderado de temperaturas

Una expresión más representativa es la *ecuación de Steinhard y Hart* que expresa la relación empírica entre la temperatura absoluta T (grados Kelvin = °C + 273,15) y la resistencia R del elemento sensor.

$$\frac{1}{T} = A + B \times \ln R + C \times \left(\ln R\right)^3 \qquad (1)$$

siendo:

A, B y C coeficientes característicos del material de la resistencia NTC.

Para determinar los coeficientes A, B y C se mide la resistencia del termistor a 3 temperaturas diferentes espaciadas un mínimo de 10 °C y se obtienen 3 ecuaciones de las que se obtienen los valores de A, B y C.

La expresión (1) permite calcular la temperatura del proceso.

$$\frac{1}{T_1} = A + B \times \ln R_1 + C \times \left(\ln R_1\right)^3$$

$$\frac{1}{T_2} = A + B \times \ln R_2 + C \times \left(\ln R_2\right)^3$$

$$\frac{1}{T_3} = A + B \times \ln R_3 + C \times \left(\ln R_3\right)^3$$

De la expresión (1), el valor de la resistencia R en función de la temperatura absoluta T es:

$$R = e^{\left\{\sqrt[3]{\beta - \frac{\alpha}{2}} - \sqrt[3]{\beta + \frac{\alpha}{2}}\right\}}$$

en la que:

$$\alpha = \frac{A - \frac{1}{T}}{C}$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{B}{3C}\right)^3 + \frac{\alpha^2}{4}}$$

En la figura 6.15 pueden verse las curvas características resistencia-temperatura de termistores y la dimensión aproximada de la sonda.

Los termistores se conectan a puentes de Wheatstone convencionales o a circuitos que convierten su resistencia a una tensión de salida proporcional.

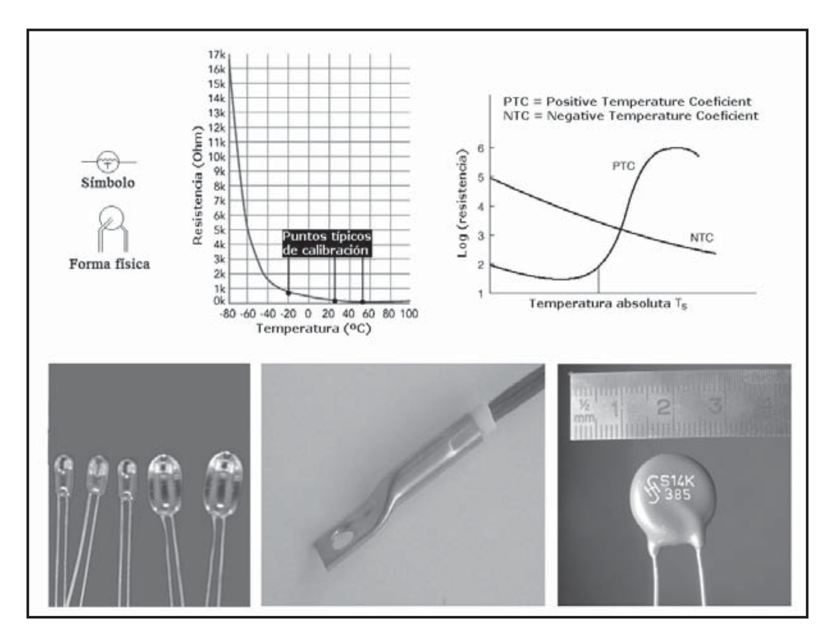


Figura 6.15 Curva resistencia-temperatura NTC y PTC del termistor y dimensión aproximada

En intervalos amplios de temperatura, los termistores tienen caracteristicas no lineales. Al tener un alto coeficiente de temperatura, poseen una mayor sensibilidad que las sondas de resistencia estudiadas y permiten incluso intervalos de medida de 1 °C (*span*). Son de pequeño tamaño y su tiempo de respuesta depende de la capacidad térmica y de la masa del termistor, variando de 0,5 a 10 segundos. La distancia entre el termistor y el instrumento de medida puede ser considerable siempre que el elemento posea una alta resistencia comparada con la de los cables de unión. La corriente que circula por el termistor, a través del circuito de medida, debe ser baja para garantizar que la variación de resistencia del elemento sea debida exclusivamente a los cambios de temperatura en el proceso.

Los termistores encuentran su principal aplicación en la medición, la compensación y el control de temperatura, y como medidores de temperatura diferencial.

6.7 Sensores de temperatura de semiconductor

El *sensor de temperatura de semiconductor* dispone de funciones de transferencia que son proporcionales a la temperatura en °K, °C o °F. En la mayor parte de las aplicaciones, la señal de salida alimenta un comparador o un convertidor A/D para convertir los datos de temperatura a un formato digital.

Los sensores desarrollados en este campo son analógicos y digitales con tensión de salida proporcional a la temperatura absoluta o a la temperatura en °C o °F, sensibilidad 10 mV/°C y una exactitud de ± 1 °C dentro del intervalo -55 °C a 150 °C. Hay analógicos con corriente de salida proporcional a la temperatura absoluta y sensibilidad de 1 μA/°C a 3 μA/°C y termostatos de -40 °C a +125 °C.

Un sensor de temperatura de silicio es un circuito integrado (IC) que puede contener un circuito de procesamiento de la señal que se encargue de la compensación de la unión fría o de la linealización dentro del mismo IC (circuito integrado).

Estos sensores iniciaron su aplicación en la protección de componentes electrónicos que pueden dañarse por altas o bajas temperaturas (ordenadores, disco duro del ordenador, cargadores de baterías y pantallas LCD - *Liquid Cristal Display*).

Otras aplicaciones de interés en el mundo industrial son (figura 6.16):

- Sensor de temperatura de dos hilos. Se caracteriza porque los dos hilos se encargan de la alimentación y de la señal de temperatura. La señal de salida es una tensión de c.c. con una impedancia de 100 kΩ o mayor, mientras que la alimentación es de c.a.
- Transmisor de corriente de 4-20 mA c.c.
- Convertidores multicanal de temperatura a señal digital.
- Convertidores de temperatura a frecuencia.

Estos sensores tienen la ventaja de ser pequeños, exactos y baratos, de modo que se prevé que aumenten, en el futuro, sus aplicaciones en la industria.

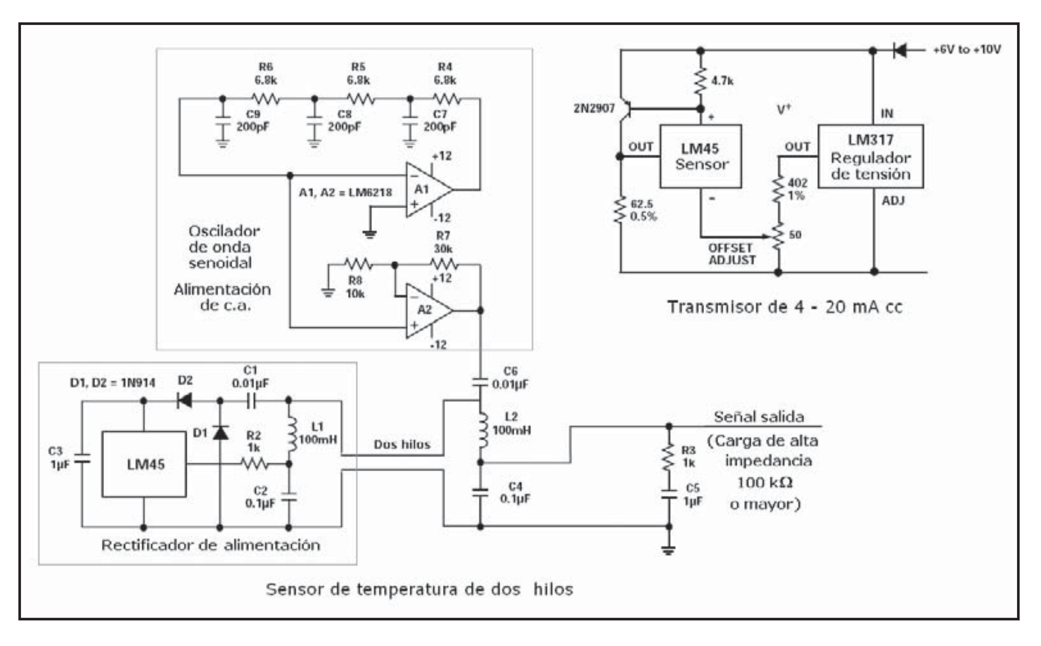


Figura 6.16 Sensor de temperatura de dos hilos y transmisor de 4-20 mA c.c. Fuente: Nacional Semiconductors

6.8 Termopares

6.8.1 Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección

El *termopar* se basa en el efecto, descubierto por Seebeek en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito cerrado formado por dos metales diferentes cuyas uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantienen a distinta temperatura (figura 6.17).

Esta circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados, el efecto Peltier (año 1834) que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de los metales distintos cuando

una corriente circula a través de la unión y el efecto Thomson (año 1854), que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente temperaturas.

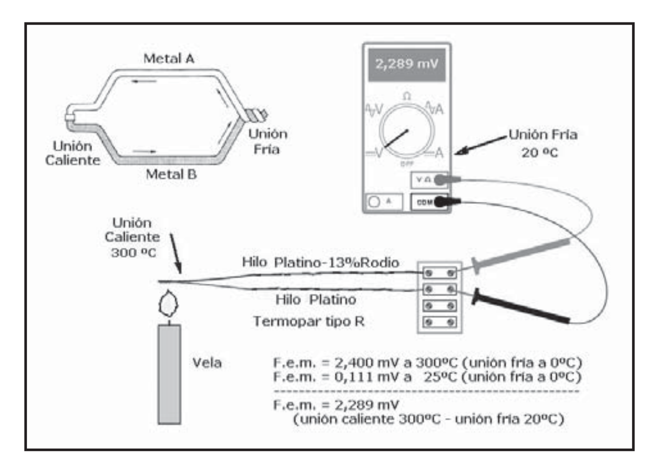


Figura 6.17 Termopar

El efecto Peltier puede ponerse de manifiesto en el montaje de la figura 6.18a. En una cruz térmica formada por la unión en su centro de dos metales distintos se hace pasar una corriente en uno u otro sentido, con el interruptor $K2$ abierto. Después de cada paso de corriente se abre $K1$ (desconectándose la pila) y se cierra $K2$ leyendo en el galvanómetro la f.e.m. creada, que es proporcional a la temperatura alcanzada por la cruz térmica en cada caso.

Se observará que restando el calentamiento óhmico, que es proporcional al cuadrado de la corriente, queda un remanente de temperatura que en un sentido de circulación de la corriente es positivo y negativo en el sentido contrario. El efecto depende de los metales que forman la unión.

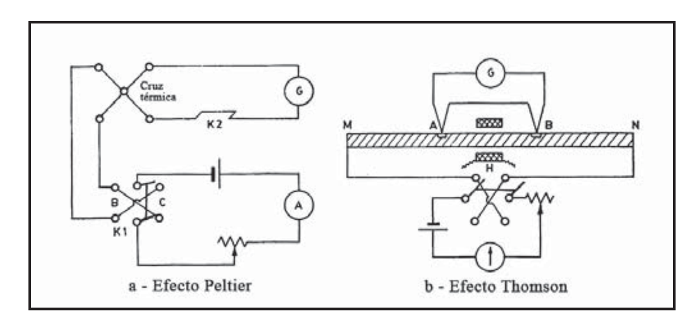


Figura 6.18 Efectos Peltier y Thomson

El efecto Thomson puede detectarse en el circuito de la figura 6.18b formado por una barra metálica MN, con un termopar diferencial AB aislado y una bobina H para calentamiento eléctrico centrada con relación a AB. En régimen, calentando con la bobina H uno de los puntos, el B por ejemplo, se presentará una diferencia de temperaturas con el A, lo que se acusará en el galvanómetro; si ahora se hace pasar una corriente por la barra MN, se notará un aumento o disminución de la temperatura diferencial con el efecto contrario si se invierte la corriente.

La combinación de los dos aspectos, el de Peltier y el de Thomson, es la causa de la circulación de corriente al cerrar el circuito en el termopar. Esta corriente puede calentar el termopar y afectar la exactitud en la medida de la temperatura, por lo que, durante la medición, debe hacerse mínimo su valor.

Estudios realizados sobre el comportamiento de termopares han permitido establecer tres leyes fundamentales:

1. *Ley del circuito homogéneo*. En un conductor metálico homogéneo no puede sostenerse la circulación de una corriente eléctrica por la aplicación exclusiva de calor.
2. *Ley de los metales intermedios*. Si en un circuito de varios conductores la temperatura es uniforme desde un punto de soldadura A a otro punto B, la suma algebraica de todas las fuerzas electromotrices es totalmente independiente de los conductores metálicos intermedios y es la misma que si se pusieran en contacto directo A y B.
3. *Ley de las temperaturas sucesivas*. La f.e.m. generada por un termopar con sus uniones a las temperaturas $T1$ y $T3$ es la suma algebraica de la f.e.m. del termopar con sus uniones a $T1$ y $T2$, y de la f.e.m. del mismo termopar con sus uniones a las temperaturas $T2$ y $T3$.

Por estas leyes, se hace evidente que en el circuito se desarrolla una pequeña tensión continua, proporcional a la temperatura de la unión de medida, siempre que haya una diferencia de temperaturas con la unión de referencia. Los valores de esta f.e.m. están tabulados en tablas de conversión con la unión de referencia a 0 °C. En la figura 6.19 se presentan las curvas características de los termopares, que pueden utilizarse como guía en la selección de los mismos.

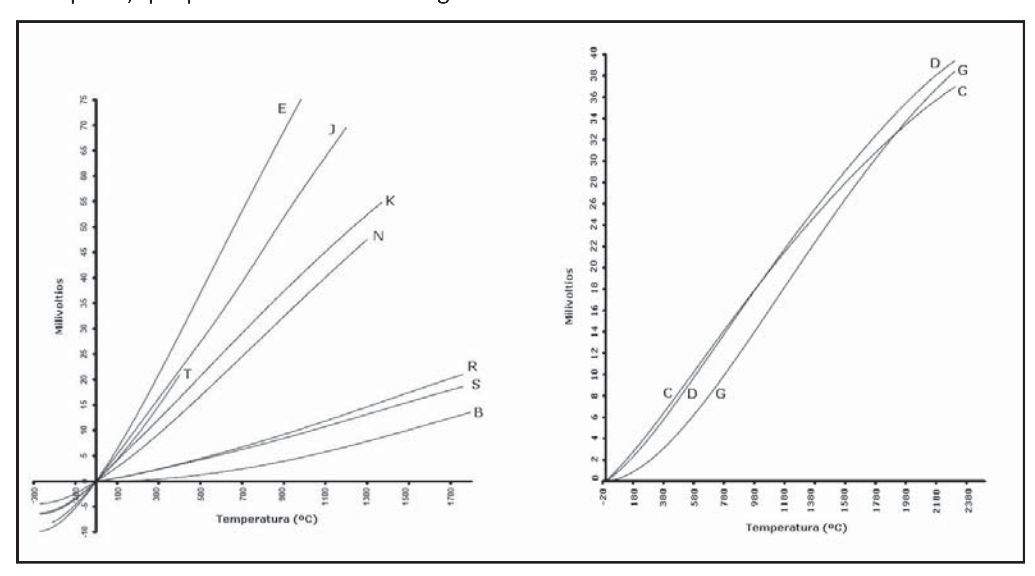


Figura 6.19 Curvas características fem/temperatura de los termopares

La selección de los alambres para termopares se hace de forma que tengan una resistencia adecuada a la corrosión, a la oxidación, a la reducción y a la cristalización, que desarrollen una f.e.m. relativamente alta, que sean estables, de bajo coste y de baja resistencia eléctrica, y que la relación entre la temperatura y la f.e.m. sea tal que el aumento de ésta sea (aproximadamente) paralelo al aumento de la temperatura.

Los termopares más comunes son:

- Termopar tipo E, de Níquel-Cromo (cromel)/Cobre-Níquel (constantan). Puede usarse en vacío o en atmósfera inerte o medianamente oxidante o reductora. Este termopar posee la f.e.m. más alta por variación de temperatura. Es adecuado para temperaturas entre -200 °C y +900 °C. Alta sensibilidad (68 μV/°C).
- Termopar tipo T, de Cobre/Cobre-Níquel (constantán). Tiene una elevada resistencia a la corrosión por humedad atmosférica o condensación y puede utilizarse en atmósferas oxidantes o reductoras. Se prefiere, generalmente, para las medidas de temperatura entre -200 °C y +260 °C.
- Termopar tipo J, de Hierro/Cobre-Níquel (constantan). Es adecuado en atmósferas inertes y para temperaturas entre -200 °C y 1.200 °C. La oxidación del hilo de hierro aumenta rápidamente por encima de 550 °C, siendo necesario un mayor diámetro del hilo hasta una temperatura límite de 750 °C. También es necesario tomar precauciones a temperaturas inferiores a 0 °C debido a la condensación del agua sobre el hierro.
- Termopar tipo K, de Níquel-Cromo (cromel) /Níquel-Aluminio (alumel). Se recomienda en atmósferas oxidantes y a temperaturas de trabajo entre 500 °C y 1.250° C. No debe ser utilizado en atmósferas reductoras ni sulfurosas, a menos que esté protegido con un tubo de protección. Se utiliza para temperaturas entre -40 °C y 1.100 °C .
- Termopar tipo R (Platino-13% Rodio/Platino). Se emplea en atmósferas oxidantes y temperaturas de trabajo de hasta 1.500 °C. Es más estable y produce una f.e.m. mayor que el tipo S. Poca sensibilidad (10 μV/°C).
- Termopar tipo S (Platino-10% Rodio/Platino), de características similares al tipo R. Poca sensibilidad (10 μV/°C).
- Tipo B (Platino-30% Rodio/Platino-6% Rodio), adecuado para altas temperaturas hasta los 1.800 °C. Poca sensibilidad (10 μV/°C).
- Termopar tipo N (84,6% Níquel-14% Cromo-1,4% Silicio)/(95,6% Níquel-0,4% Silicio). Protegido con aislamiento de óxido de berilio y camisa de molibdeno y de tantalio, se emplea en atmósferas inertes o en vacío a las temperaturas de trabajo de 0 °C a 2316 °C. Se utiliza, cada vez con mayor frecuencia, para sustituir al tipo K, presentando una mejor estabilidad y una mejor resistencia a la oxidación a altas temperaturas.

Otros termopares de uso reciente son:

- Tipo C (Tungsteno-5% Renio/Tungsteno-26% Renio) (ASTME 988), con temperaturas de trabajo entre 0 °C y 2320 °C.
- Tipo D (Tungsteno-3% Renio/Tungsteno-25% Renio) (ASTME 988), con temperaturas de trabajo entre 0 °C y 2495 °C.
- Tipo G (Tungsteno/Tungsteno-26% Renio), con temperaturas de trabajo entre 0 °C y 2320 °C.
- Tipo L (Hierro/Cobre-Níquel) (DIN 43710), similar al tipo J, con temperaturas de trabajo entre -200 °C y +900 °C.
- Tipo U (Cobre/Cobre-Níquel) (DIN 43710), similar al tipo T, con temperaturas de trabajo entre -200 °C y +600 °C.

La tabla 6.7 muestra las tolerancias de las clases de termopares y el intervalo de temperaturas de trabajo.

TERMOPAR	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3	Temperaturas de trabajo
Tipo E Ni Cr/Cu Ni	±1.5°C ó ±(0.004 x t) -40°C a 800°C	±2.5°C ó ±(0.0075 x t) -40°C a 900°C	±2.5°C ó ±(0.0015 x t) -200°C a 40°C	-200 a 915 ºC
Tipo T Cu/Cu Ni	±0.5°C ó ±(0.004 x t) -40°C a 350°C	±1°C ó ±(0.0075 x t) -40°C a 350°C	±1°C ó ±(0.0015 x t) -200°C a 40°C	-200 a +400 ºC
Tipo J Fe/Cu Ni	±1.5°C ó ±(0.004 x t) -40°C a 750°C	±2.5°C ó ±(0.0075 x t) -40°C a 750°C	---------	-200 a +1200 ºC
Tipo K Ni Cr/Ni Al	±1.5°C ó ±(0.004 x t) -40°C a 1000°C	±2.5°C ó ±(0.0075 x t) -40°C a 1200°C	±2.5°C ó ±(0.0015 x t) -200°C a 40°C	-200 a +1372 ºC
Tipo R Pt13%Rh/Pt	±1°C ó (1+0.003(t-1100)) 0°C a 1600°C	±1.5°C ó ±(0.0025 x t) 0°C a 1600°C	---------	-50 a +1768 ºC
Tipo S Pt10%Rh/Pt	±1°C ó (1+0.003(t-1100)) 0°C a 1600°C	±1.5°C ó ±(0.0025 x t) 0°C a 1600°C	---------	-50 a +1768 ºC
Tipo B Pt30%Rh/Pt6%Rh	---------	±1.5°C ó ±(0.0025 x t) 600°C a 1700°C	±4°C ó ±(0.005 x t) 600°C a 1700°C	0 a 1820 ºC
Tipo N Ni Cr Si/Ni Si Mg	±1.5°C ó ±(0.004 x t) 40°C a 1000°C	±2.5°C ó ±(0.0075 x t) -40°C a 1200°C	±2.5°C ó ±(0.0015 x t) -200°C a 40°C	-270 a 1300 ºC

Tabla 6.7 Tolerancias y temperaturas de trabajo de termopares. Norma IEC 584-1

Termopar tipo B - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002
10	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003
20	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
30	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000
40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
50	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006
60	0.006	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.009	0.010	0.010	0.011	0.011
70	0.011	0.012	0.012	0.013	0.014	0.014	0.015	0.015	0.016	0.017	0.017
80	0.017	0.018	0.019	0.020	0.020	0.021	0.022	0.022	0.023	0.024	0.025
90	0.025	0.026	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.031	0.032	0.033
100	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043
110	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053
120	0.053	0.055	0.056	0.057	0.058	0.059	0.060	0.062	0.063	0.064	0.065
130	0.065	0.066	0.068	0.069	0.070	0.072	0.073	0.074	0.075	0.077	0.078
140	0.078	0.079	0.081	0.082	0.084	0.085	0.086	0.088	0.089	0.091	0.092
150	0.092	0.094	0.095	0.096	0.098	0.099	0.101	0.102	0.104	0.106	0.107
160	0.107	0.109	0.110	0.112	0.113	0.115	0.117	0.118	0.120	0.122	0.123
170	0.123	0.125	0.127	0.128	0.130	0.132	0.134	0.135	0.137	0.139	0.141
180	0.141	0.142	0.144	0.146	0.148	0.150	0.151	0.153	0.155	0.157	0.159
190	0.159	0.161	0.163	0.165	0.166	0.168	0.170	0.172	0.174	0.176	0.178
200	0.178	0.180	0.182	0.184	0.186	0.188	0.190	0.192	0.195	0.197	0.199
210	0.199	0.201	0.203	0.205	0.207	0.209	0.212	0.214	0.216	0.218	0.220
220	0.220	0.222	0.225	0.227	0.229	0.231	0.234	0.236	0.238	0.241	0.243
230	0.243	0.245	0.248	0.250	0.252	0.255	0.257	0.259	0.262	0.264	0.267
240	0.267	0.269	0.271	0.274	0.276	0.279	0.281	0.284	0.286	0.289	0.291
250	0.291	0.294	0.296	0.299	0.301	0.304	0.307	0.309	0.312	0.314	0.317

Termopar tipo B - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
260	0.317	0.320	0.322	0.325	0.328	0.330	0.333	0.336	0.338	0.341	0.344
270	0.344	0.347	0.349	0.352	0.355	0.358	0.360	0.363	0.366	0.369	0.372
280	0.372	0.375	0.377	0.380	0.383	0.386	0.389	0.392	0.395	0.398	0.401
290	0.401	0.404	0.407	0.410	0.413	0.416	0.419	0.422	0.425	0.428	0.431
300	0.431	0.434	0.437	0.440	0.443	0.446	0.449	0.452	0.455	0.458	0.462
310	0.462	0.465	0.468	0.471	0.474	0.478	0.481	0.484	0.487	0.490	0.494
320	0.494	0.497	0.500	0.503	0.507	0.510	0.513	0.517	0.520	0.523	0.527
330	0.527	0.530	0.533	0.537	0.540	0.544	0.547	0.550	0.554	0.557	0.561
340	0.561	0.564	0.568	0.571	0.575	0.578	0.582	0.585	0.589	0.592	0.596
350	0.596	0.599	0.603	0.607	0.610	0.614	0.617	0.621	0.625	0.628	0.632
360	0.632	0.636	0.639	0.643	0.647	0.650	0.654	0.658	0.662	0.665	0.669
370	0.669	0.673	0.677	0.680	0.684	0.688	0.692	0.696	0.700	0.703	0.707
380	0.707	0.711	0.715	0.719	0.723	0.727	0.731	0.735	0.738	0.742	0.746
390	0.746	0.750	0.754	0.758	0.762	0.766	0.770	0.774	0.778	0.782	0.787
400	0.787	0.791	0.795	0.799	0.803	0.807	0.811	0.815	0.819	0.824	0.828
410	0.828	0.832	0.836	0.840	0.844	0.849	0.853	0.857	0.861	0.866	0.870
420	0.870	0.874	0.878	0.883	0.887	0.891	0.896	0.900	0.904	0.909	0.913
430	0.913	0.917	0.922	0.926	0.930	0.935	0.939	0.944	0.948	0.953	0.957
440	0.957	0.961	0.966	0.970	0.975	0.979	0.984	0.988	0.993	0.997	1.002
450	1.002	1.007	1.011	1.016	1.020	1.025	1.030	1.034	1.039	1.043	1.048
460	1.048	1.053	1.057	1.062	1.067	1.071	1.076	1.081	1.086	1.090	1.095
470	1.095	1.100	1.105	1.109	1.114	1.119	1.124	1.129	1.133	1.138	1.143
480	1.143	1.148	1.153	1.158	1.163	1.167	1.172	1.177	1.182	1.187	1.192
490	1.192	1.197	1.202	1.207	1.212	1.217	1.222	1.227	1.232	1.237	1.242
500	1.242	1.247	1.252	1.257	1.262	1.267	1.272	1.277	1.282	1.288	1.293
510	1.293	1.298	1.303	1.308	1.313	1.318	1.324	1.329	1.334	1.339	1.344
520	1.344	1.350	1.355	1.360	1.365	1.371	1.376	1.381	1.387	1.392	1.397
530	1.397	1.402	1.408	1.413	1.418	1.424	1.429	1.435	1.440	1.445	1.451
540	1.451	1.456	1.462	1.467	1.472	1.478	1.483	1.489	1.494	1.500	1.505
550	1.505	1.511	1.516	1.522	1.527	1.533	1.539	1.544	1.550	1.555	1.561
560	1.561	1.566	1.572	1.578	1.583	1.589	1.595	1.600	1.606	1.612	1.617
570	1.617	1.623	1.629	1.634	1.640	1.646	1.652	1.657	1.663	1.669	1.675
580	1.675	1.680	1.686	1.692	1.698	1.704	1.709	1.715	1.721	1.727	1.733
590	1.733	1.739	1.745	1.750	1.756	1.762	1.768	1.774	1.780	1.786	1.792
600	1.792	1.798	1.804	1.810	1.816	1.822	1.828	1.834	1.840	1.846	1.852
610	1.852	1.858	1.864	1.870	1.876	1.882	1.888	1.894	1.901	1.907	1.913
620	1.913	1.919	1.925	1.931	1.937	1.944	1.950	1.956	1.962	1.968	1.975
630	1.975	1.981	1.987	1.993	1.999	2.006	2.012	2.018	2.025	2.031	2.037
640	2.037	2.043	2.050	2.056	2.062	2.069	2.075	2.082	2.088	2.094	2.101
650	2.101	2.107	2.113	2.120	2.126	2.133	2.139	2.146	2.152	2.158	2.165
660	2.165	2.171	2.178	2.184	2.191	2.197	2.204	2.210	2.217	2.224	2.230
670	2.230	2.237	2.243	2.250	2.256	2.263	2.270	2.276	2.283	2.289	2.296

Termopar tipo B - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
680	2.296	2.303	2.309	2.316	2.323	2.329	2.336	2.343	2.350	2.356	2.363
690	2.363	2.370	2.376	2.383	2.390	2.397	2.403	2.410	2.417	2.424	2.431
700	2.431	2.437	2.444	2.451	2.458	2.465	2.472	2.479	2.485	2.492	2.499
710	2.499	2.506	2.513	2.520	2.527	2.534	2.541	2.548	2.555	2.562	2.569
720	2.569	2.576	2.583	2.590	2.597	2.604	2.611	2.618	2.625	2.632	2.639
730	2.639	2.646	2.653	2.660	2.667	2.674	2.681	2.688	2.696	2.703	2.710
740	2.710	2.717	2.724	2.731	2.738	2.746	2.753	2.760	2.767	2.775	2.782
750	2.782	2.789	2.796	2.803	2.811	2.818	2.825	2.833	2.840	2.847	2.854
760	2.854	2.862	2.869	2.876	2.884	2.891	2.898	2.906	2.913	2.921	2.928
770	2.928	2.935	2.943	2.950	2.958	2.965	2.973	2.980	2.987	2.995	3.002
780	3.002	3.010	3.017	3.025	3.032	3.040	3.047	3.055	3.062	3.070	3.078
790	3.078	3.085	3.093	3.100	3.108	3.116	3.123	3.131	3.138	3.146	3.154
800	3.154	3.161	3.169	3.177	3.184	3.192	3.200	3.207	3.215	3.223	3.230
810	3.230	3.238	3.246	3.254	3.261	3.269	3.277	3.285	3.292	3.300	3.308
820	3.308	3.316	3.324	3.331	3.339	3.347	3.355	3.363	3.371	3.379	3.386
830	3.386	3.394	3.402	3.410	3.418	3.426	3.434	3.442	3.450	3.458	3.466
840	3.466	3.474	3.482	3.490	3.498	3.506	3.514	3.522	3.530	3.538	3.546
850	3.546	3.554	3.562	3.570	3.578	3.586	3.594	3.602	3.610	3.618	3.626
860	3.626	3.634	3.643	3.651	3.659	3.667	3.675	3.683	3.692	3.700	3.708
870	3.708	3.716	3.724	3.732	3.741	3.749	3.757	3.765	3.774	3.782	3.790
880	3.790	3.798	3.807	3.815	3.823	3.832	3.840	3.848	3.857	3.865	3.873
890	3.873	3.882	3.890	3.898	3.907	3.915	3.923	3.932	3.940	3.949	3.957
900	3.957	3.965	3.974	3.982	3.991	3.999	4.008	4.016	4.024	4.033	4.041
910	4.041	4.050	4.058	4.067	4.075	4.084	4.093	4.101	4.110	4.118	4.127
920	4.127	4.135	4.144	4.152	4.161	4.170	4.178	4.187	4.195	4.204	4.213
930	4.213	4.221	4.230	4.239	4.247	4.256	4.265	4.273	4.282	4.291	4.299
940	4.299	4.308	4.317	4.326	4.334	4.343	4.352	4.360	4.369	4.378	4.387
950	4.387	4.396	4.404	4.413	4.422	4.431	4.440	4.448	4.457	4.466	4.475
960	4.475	4.484	4.493	4.501	4.510	4.519	4.528	4.537	4.546	4.555	4.564
970	4.564	4.573	4.582	4.591	4.599	4.608	4.617	4.626	4.635	4.644	4.653
980	4.653	4.662	4.671	4.680	4.689	4.698	4.707	4.716	4.725	4.734	4.743
990	4.743	4.753	4.762	4.771	4.780	4.789	4.798	4.807	4.816	4.825	4.834
1000	4.834	4.843	4.853	4.862	4.871	4.880	4.889	4.898	4.908	4.917	4.926
1010	4.926	4.935	4.944	4.954	4.963	4.972	4.981	4.990	5.000	5.009	5.018
1020	5.018	5.027	5.037	5.046	5.055	5.065	5.074	5.083	5.092	5.102	5.111
1030	5.111	5.120	5.130	5.139	5.148	5.158	5.167	5.176	5.186	5.195	5.205
1040	5.205	5.214	5.223	5.233	5.242	5.252	5.261	5.270	5.280	5.289	5.299
1050	5.299	5.308	5.318	5.327	5.337	5.346	5.356	5.365	5.375	5.384	5.394
1060	5.394	5.403	5.413	5.422	5.432	5.441	5.451	5.460	5.470	5.480	5.489
1070	5.489	5.499	5.508	5.518	5.528	5.537	5.547	5.556	5.566	5.576	5.585
1080	5.585	5.595	5.605	5.614	5.624	5.634	5.643	5.653	5.663	5.672	5.682
1090	5.682	5.692	5.702	5.711	5.721	5.731	5.740	5.750	5.760	5.770	5.780

Termopar tipo B - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1100	5.780	5.789	5.799	5.809	5.819	5.828	5.838	5.848	5.858	5.868	5.878
1110	5.878	5.887	5.897	5.907	5.917	5.927	5.937	5.947	5.956	5.966	5.976
1120	5.976	5.986	5.996	6.006	6.016	6.026	6.036	6.046	6.055	6.065	6.075
1130	6.075	6.085	6.095	6.105	6.115	6.125	6.135	6.145	6.155	6.165	6.175
1140	6.175	6.185	6.195	6.205	6.215	6.225	6.235	6.245	6.256	6.266	6.276
1150	6.276	6.286	6.296	6.306	6.316	6.326	6.336	6.346	6.356	6.367	6.377
1160	6.377	6.387	6.397	6.407	6.417	6.427	6.438	6.448	6.458	6.468	6.478
1170	6.478	6.488	6.499	6.509	6.519	6.529	6.539	6.550	6.560	6.570	6.580
1180	6.580	6.591	6.601	6.611	6.621	6.632	6.642	6.652	6.663	6.673	6.683
1190	6.683	6.693	6.704	6.714	6.724	6.735	6.745	6.755	6.766	6.776	6.786
1200	6.786	6.797	6.807	6.818	6.828	6.838	6.849	6.859	6.869	6.880	6.890
1210	6.890	6.901	6.911	6.922	6.932	6.942	6.953	6.963	6.974	6.984	6.995
1220	6.995	7.005	7.016	7.026	7.037	7.047	7.058	7.068	7.079	7.089	7.100
1230	7.100	7.110	7.121	7.131	7.142	7.152	7.163	7.173	7.184	7.194	7.205
1240	7.205	7.216	7.226	7.237	7.247	7.258	7.269	7.279	7.290	7.300	7.311
1250	7.311	7.322	7.332	7.343	7.353	7.364	7.375	7.385	7.396	7.407	7.417
1260	7.417	7.428	7.439	7.449	7.460	7.471	7.482	7.492	7.503	7.514	7.524
1270	7.524	7.535	7.546	7.557	7.567	7.578	7.589	7.600	7.610	7.621	7.632
1280	7.632	7.643	7.653	7.664	7.675	7.686	7.697	7.707	7.718	7.729	7.740
1290	7.740	7.751	7.761	7.772	7.783	7.794	7.805	7.816	7.827	7.837	7.848
1300	7.848	7.859	7.870	7.881	7.892	7.903	7.914	7.924	7.935	7.946	7.957
1310	7.957	7.968	7.979	7.990	8.001	8.012	8.023	8.034	8.045	8.056	8.066
1320	8.066	8.077	8.088	8.099	8.110	8.121	8.132	8.143	8.154	8.165	8.176
1330	8.176	8.187	8.198	8.209	8.220	8.231	8.242	8.253	8.264	8.275	8.286
1340	8.286	8.298	8.309	8.320	8.331	8.342	8.353	8.364	8.375	8.386	8.397
1350	8.397	8.408	8.419	8.430	8.441	8.453	8.464	8.475	8.486	8.497	8.508
1360	8.508	8.519	8.530	8.542	8.553	8.564	8.575	8.586	8.597	8.608	8.620
1370	8.620	8.631	8.642	8.653	8.664	8.675	8.687	8.698	8.709	8.720	8.731
1380	8.731	8.743	8.754	8.765	8.776	8.787	8.799	8.810	8.821	8.832	8.844
1390	8.844	8.855	8.866	8.877	8.889	8.900	8.911	8.922	8.934	8.945	8.956
1400	8.956	8.967	8.979	8.990	9.001	9.013	9.024	9.035	9.047	9.058	9.069
1410	9.069	9.080	9.092	9.103	9.114	9.126	9.137	9.148	9.160	9.171	9.182
1420	9.182	9.194	9.205	9.216	9.228	9.239	9.251	9.262	9.273	9.285	9.296
1430	9.296	9.307	9.319	9.330	9.342	9.353	9.364	9.376	9.387	9.398	9.410
1440	9.410	9.421	9.433	9.444	9.456	9.467	9.478	9.490	9.501	9.513	9.524
1450	9.524	9.536	9.547	9.558	9.570	9.581	9.593	9.604	9.616	9.627	9.639
1460	9.639	9.650	9.662	9.673	9.684	9.696	9.707	9.719	9.730	9.742	9.753
1470	9.753	9.765	9.776	9.788	9.799	9.811	9.822	9.834	9.845	9.857	9.868
1480	9.868	9.880	9.891	9.903	9.914	9.926	9.937	9.949	9.961	9.972	9.984
1490	9.984	9.995	10.007	10.018	10.030	10.041	10.053	10.064	10.076	10.088	10.099
1500	10.099	10.111	10.122	10.134	10.145	10.157	10.168	10.180	10.192	10.203	10.215
1510	10.215	10.226	10.238	10.249	10.261	10.273	10.284	10.296	10.307	10.319	10.331
1520	10.331	10.342	10.354	10.365	10.377	10.389	10.400	10.412	10.423	10.435	10.447

Termopar tipo B - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1530	10.447	10.458	10.470	10.482	10.493	10.505	10.516	10.528	10.540	10.551	10.563
1540	10.563	10.575	10.586	10.598	10.609	10.621	10.633	10.644	10.656	10.668	10.679
1550	10.679	10.691	10.703	10.714	10.726	10.738	10.749	10.761	10.773	10.784	10.796
1560	10.796	10.808	10.819	10.831	10.843	10.854	10.866	10.877	10.889	10.901	10.913
1570	10.913	10.924	10.936	10.948	10.959	10.971	10.983	10.994	11.006	11.018	11.029
1580	11.029	11.041	11.053	11.064	11.076	11.088	11.099	11.111	11.123	11.134	11.146
1590	11.146	11.158	11.169	11.181	11.193	11.205	11.216	11.228	11.240	11.251	11.263
1600	11.263	11.275	11.286	11.298	11.310	11.321	11.333	11.345	11.357	11.368	11.380
1610	11.380	11.392	11.403	11.415	11.427	11.438	11.450	11.462	11.474	11.485	11.497
1620	11.497	11.509	11.520	11.532	11.544	11.555	11.567	11.579	11.591	11.602	11.614
1630	11.614	11.626	11.637	11.649	11.661	11.673	11.684	11.696	11.708	11.719	11.731
1640	11.731	11.743	11.754	11.766	11.778	11.790	11.801	11.813	11.825	11.836	11.848
1650	11.848	11.860	11.871	11.883	11.895	11.907	11.918	11.930	11.942	11.953	11.965
1660	11.965	11.977	11.988	12.000	12.012	12.024	12.035	12.047	12.059	12.070	12.082
1670	12.082	12.094	12.105	12.117	12.129	12.141	12.152	12.164	12.176	12.187	12.199
1680	12.199	12.211	12.222	12.234	12.246	12.257	12.269	12.281	12.292	12.304	12.316
1690	12.316	12.327	12.339	12.351	12.363	12.374	12.386	12.398	12.409	12.421	12.433
1700	12.433	12.444	12.456	12.468	12.479	12.491	12.503	12.514	12.526	12.538	12.549
1710	12.549	12.561	12.572	12.584	12.596	12.607	12.619	12.631	12.642	12.654	12.666
1720	12.666	12.677	12.689	12.701	12.712	12.724	12.736	12.747	12.759	12.770	12.782
1730	12.782	12.794	12.805	12.817	12.829	12.840	12.852	12.863	12.875	12.887	12.898
1740	12.898	12.910	12.921	12.933	12.945	12.956	12.968	12.980	12.991	13.003	13.014
1750	13.014	13.026	13.037	13.049	13.061	13.072	13.084	13.095	13.107	13.119	13.130
1760	13.130	13.142	13.153	13.165	13.176	13.188	13.200	13.211	13.223	13.234	13.246
1770	13.246	13.257	13.269	13.280	13.292	13.304	13.315	13.327	13.338	13.350	13.361
1780	13.361	13.373	13.384	13.396	13.407	13.419	13.430	13.442	13.453	13.465	13.476
1790	13.476	13.488	13.499	13.511	13.522	13.534	13.545	13.557	13.568	13.580	13.591
1800	13.591	13.603	13.614	13.626	13.637	13.649	13.660	13.672	13.683	13.694	13.706
1810	13.706	13.717	13.729	13.740	13.752	13.763	13.775	13.786	13.797	13.809	13.820
1820	13.820										

Termopar tipo E - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-270	-9.835										
-260	-9.797	-9.802	-9.808	-9.813	-9.817	-9.821	-9.825	-9.828	-9.831	-9.833	-9.835
-250	-9.718	-9.728	-9.737	-9.746	-9.754	-9.762	-9.770	-9.777	-9.784	-9.790	-9.797
-240	-9.604	-9.617	-9.630	-9.642	-9.654	-9.666	-9.677	-9.688	-9.698	-9.709	-9.718
-230	-9.455	-9.471	-9.487	-9.503	-9.519	-9.534	-9.548	-9.563	-9.577	-9.591	-9.604
-220	-9.274	-9.293	-9.313	-9.331	-9.350	-9.368	-9.386	-9.404	-9.421	-9.438	-9.455
-210	-9.063	-9.085	-9.107	-9.129	-9.151	-9.172	-9.193	-9.214	-9.234	-9.254	-9.274
-200	-8.825	-8.850	-8.874	-8.899	-8.923	-8.947	-8.971	-8.994	-9.017	-9.040	-9.063
-190	-8.561	-8.588	-8.616	-8.643	-8.669	-8.696	-8.722	-8.748	-8.774	-8.799	-8.825
-180	-8.273	-8.303	-8.333	-8.362	-8.391	-8.420	-8.449	-8.477	-8.505	-8.533	-8.561

Termopar tipo E - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-170	-7.963	-7.995	-8.027	-8.059	-8.090	-8.121	-8.152	-8.183	-8.213	-8.243	-8.273
-160	-7.632	-7.666	-7.700	-7.733	-7.767	-7.800	-7.833	-7.866	-7.899	-7.931	-7.963
-150	-7.279	-7.315	-7.351	-7.387	-7.423	-7.458	-7.493	-7.528	-7.563	-7.597	-7.632
-140	-6.907	-6.945	-6.983	-7.021	-7.058	-7.096	-7.133	-7.170	-7.206	-7.243	-7.279
-130	-6.516	-6.556	-6.596	-6.636	-6.675	-6.714	-6.753	-6.792	-6.831	-6.869	-6.907
-120	-6.107	-6.149	-6.191	-6.232	-6.273	-6.314	-6.355	-6.396	-6.436	-6.476	-6.516
-110	-5.681	-5.724	-5.767	-5.810	-5.853	-5.896	-5.939	-5.981	-6.023	-6.065	-6.107
-100	-5.237	-5.282	-5.327	-5.372	-5.417	-5.461	-5.505	-5.549	-5.593	-5.637	-5.681
-90	-4.777	-4.824	-4.871	-4.917	-4.963	-5.009	-5.055	-5.101	-5.147	-5.192	-5.237
-80	-4.302	-4.350	-4.398	-4.446	-4.494	-4.542	-4.589	-4.636	-4.684	-4.731	-4.777
-70	-3.811	-3.861	-3.911	-3.960	-4.009	-4.058	-4.107	-4.156	-4.205	-4.254	-4.302
-60	-3.306	-3.357	-3.408	-3.459	-3.510	-3.561	-3.611	-3.661	-3.711	-3.761	-3.811
-50	-2.787	-2.840	-2.892	-2.944	-2.996	-3.048	-3.100	-3.152	-3.204	-3.255	-3.306
-40	-2.255	-2.309	-2.362	-2.416	-2.469	-2.523	-2.576	-2.629	-2.682	-2.735	-2.787
-30	-1.709	-1.765	-1.820	-1.874	-1.929	-1.984	-2.038	-2.093	-2.147	-2.201	-2.255
-20	-1.152	-1.208	-1.264	-1.320	-1.376	-1.432	-1.488	-1.543	-1.599	-1.654	-1.709
-10	-0.582	-0.639	-0.697	-0.754	-0.811	-0.868	-0.925	-0.982	-1.039	-1.095	-1.152
0	0.000	-0.059	-0.117	-0.176	-0.234	-0.292	-0.350	-0.408	-0.466	-0.524	-0.582
0	0.000	0.059	0.118	0.176	0.235	0.294	0.354	0.413	0.472	0.532	0.591
10	0.591	0.651	0.711	0.770	0.830	0.890	0.950	1.010	1.071	1.131	1.192
20	1.192	1.252	1.313	1.373	1.434	1.495	1.556	1.617	1.678	1.740	1.801
30	1.801	1.862	1.924	1.986	2.047	2.109	2.171	2.233	2.295	2.357	2.420
40	2.420	2.482	2.545	2.607	2.670	2.733	2.795	2.858	2.921	2.984	3.048
50	3.048	3.111	3.174	3.238	3.301	3.365	3.429	3.492	3.556	3.620	3.685
60	3.685	3.749	3.813	3.877	3.942	4.006	4.071	4.136	4.200	4.265	4.330
70	4.330	4.395	4.460	4.526	4.591	4.656	4.722	4.788	4.853	4.919	4.985
80	4.985	5.051	5.117	5.183	5.249	5.315	5.382	5.448	5.514	5.581	5.648
90	5.648	5.714	5.781	5.848	5.915	5.982	6.049	6.117	6.184	6.251	6.319
100	6.319	6.386	6.454	6.522	6.590	6.658	6.725	6.794	6.862	6.930	6.998
110	6.998	7.066	7.135	7.203	7.272	7.341	7.409	7.478	7.547	7.616	7.685
120	7.685	7.754	7.823	7.892	7.962	8.031	8.101	8.170	8.240	8.309	8.379
130	8.379	8.449	8.519	8.589	8.659	8.729	8.799	8.869	8.940	9.010	9.081
140	9.081	9.151	9.222	9.292	9.363	9.434	9.505	9.576	9.647	9.718	9.789
150	9.789	9.860	9.931	10.003	10.074	10.145	10.217	10.288	10.360	10.432	10.503
160	10.503	10.575	10.647	10.719	10.791	10.863	10.935	11.007	11.080	11.152	11.224
170	11.224	11.297	11.369	11.442	11.514	11.587	11.660	11.733	11.805	11.878	11.951
180	11.951	12.024	12.097	12.170	12.243	12.317	12.390	12.463	12.537	12.610	12.684
190	12.684	12.757	12.831	12.904	12.978	13.052	13.126	13.199	13.273	13.347	13.421
200	13.421	13.495	13.569	13.644	13.718	13.792	13.866	13.941	14.015	14.090	14.164
210	14.164	14.239	14.313	14.388	14.463	14.537	14.612	14.687	14.762	14.837	14.912
220	14.912	14.987	15.062	15.137	15.212	15.287	15.362	15.438	15.513	15.588	15.664
230	15.664	15.739	15.815	15.890	15.966	16.041	16.117	16.193	16.269	16.344	16.420
240	16.420	16.496	16.572	16.648	16.724	16.800	16.876	16.952	17.028	17.104	17.181

Termopar tipo E - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
250	17.181	17.257	17.333	17.409	17.486	17.562	17.639	17.715	17.792	17.868	17.945
260	17.945	18.021	18.098	18.175	18.252	18.328	18.405	18.482	18.559	18.636	18.713
270	18.713	18.790	18.867	18.944	19.021	19.098	19.175	19.252	19.330	19.407	19.484
280	19.484	19.561	19.639	19.716	19.794	19.871	19.948	20.026	20.103	20.181	20.259
290	20.259	20.336	20.414	20.492	20.569	20.647	20.725	20.803	20.880	20.958	21.036
300	21.036	21.114	21.192	21.270	21.348	21.426	21.504	21.582	21.660	21.739	21.817
310	21.817	21.895	21.973	22.051	22.130	22.208	22.286	22.365	22.443	22.522	22.600
320	22.600	22.678	22.757	22.835	22.914	22.993	23.071	23.150	23.228	23.307	23.386
330	23.386	23.464	23.543	23.622	23.701	23.780	23.858	23.937	24.016	24.095	24.174
340	24.174	24.253	24.332	24.411	24.490	24.569	24.648	24.727	24.806	24.885	24.964
350	24.964	25.044	25.123	25.202	25.281	25.360	25.440	25.519	25.598	25.678	25.757
360	25.757	25.836	25.916	25.995	26.075	26.154	26.233	26.313	26.392	26.472	26.552
370	26.552	26.631	26.711	26.790	26.870	26.950	27.029	27.109	27.189	27.268	27.348
380	27.348	27.428	27.507	27.587	27.667	27.747	27.827	27.907	27.986	28.066	28.146
390	28.146	28.226	28.306	28.386	28.466	28.546	28.626	28.706	28.786	28.866	28.946
400	28.946	29.026	29.106	29.186	29.266	29.346	29.427	29.507	29.587	29.667	29.747
410	29.747	29.827	29.908	29.988	30.068	30.148	30.229	30.309	30.389	30.470	30.550
420	30.550	30.630	30.711	30.791	30.871	30.952	31.032	31.112	31.193	31.273	31.354
430	31.354	31.434	31.515	31.595	31.676	31.756	31.837	31.917	31.998	32.078	32.159
440	32.159	32.239	32.320	32.400	32.481	32.562	32.642	32.723	32.803	32.884	32.965
450	32.965	33.045	33.126	33.207	33.287	33.368	33.449	33.529	33.610	33.691	33.772
460	33.772	33.852	33.933	34.014	34.095	34.175	34.256	34.337	34.418	34.498	34.579
470	34.579	34.660	34.741	34.822	34.902	34.983	35.064	35.145	35.226	35.307	35.387
480	35.387	35.468	35.549	35.630	35.711	35.792	35.873	35.954	36.034	36.115	36.196
490	36.196	36.277	36.358	36.439	36.520	36.601	36.682	36.763	36.843	36.924	37.005
500	37.005	37.086	37.167	37.248	37.329	37.410	37.491	37.572	37.653	37.734	37.815
510	37.815	37.896	37.977	38.058	38.139	38.220	38.300	38.381	38.462	38.543	38.624
520	38.624	38.705	38.786	38.867	38.948	39.029	39.110	39.191	39.272	39.353	39.434
530	39.434	39.515	39.596	39.677	39.758	39.839	39.920	40.001	40.082	40.163	40.243
540	40.243	40.324	40.405	40.486	40.567	40.648	40.729	40.810	40.891	40.972	41.053
550	41.053	41.134	41.215	41.296	41.377	41.457	41.538	41.619	41.700	41.781	41.862
560	41.862	41.943	42.024	42.105	42.185	42.266	42.347	42.428	42.509	42.590	42.671
570	42.671	42.751	42.832	42.913	42.994	43.075	43.156	43.236	43.317	43.398	43.479
580	43.479	43.560	43.640	43.721	43.802	43.883	43.963	44.044	44.125	44.206	44.286
590	44.286	44.367	44.448	44.529	44.609	44.690	44.771	44.851	44.932	45.013	45.093
600	45.093	45.174	45.255	45.335	45.416	45.497	45.577	45.658	45.738	45.819	45.900
610	45.900	45.980	46.061	46.141	46.222	46.302	46.383	46.463	46.544	46.624	46.705
620	46.705	46.785	46.866	46.946	47.027	47.107	47.188	47.268	47.349	47.429	47.509
630	47.509	47.590	47.670	47.751	47.831	47.911	47.992	48.072	48.152	48.233	48.313
640	48.313	48.393	48.474	48.554	48.634	48.715	48.795	48.875	48.955	49.035	49.116
650	49.116	49.196	49.276	49.356	49.436	49.517	49.597	49.677	49.757	49.837	49.917
660	49.917	49.997	50.077	50.157	50.238	50.318	50.398	50.478	50.558	50.638	50.718
670	50.718	50.798	50.878	50.958	51.038	51.118	51.197	51.277	51.357	51.437	51.517

Termopar tipo E - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
680	51.517	51.597	51.677	51.757	51.837	51.916	51.996	52.076	52.156	52.236	52.315
690	52.315	52.395	52.475	52.555	52.634	52.714	52.794	52.873	52.953	53.033	53.112
700	53.112	53.192	53.272	53.351	53.431	53.510	53.590	53.670	53.749	53.829	53.908
710	53.908	53.988	54.067	54.147	54.226	54.306	54.385	54.465	54.544	54.624	54.703
720	54.703	54.782	54.862	54.941	55.021	55.100	55.179	55.259	55.338	55.417	55.497
730	55.497	55.576	55.655	55.734	55.814	55.893	55.972	56.051	56.131	56.210	56.289
740	56.289	56.368	56.447	56.526	56.606	56.685	56.764	56.843	56.922	57.001	57.080
750	57.080	57.159	57.238	57.317	57.396	57.475	57.554	57.633	57.712	57.791	57.870
760	57.870	57.949	58.028	58.107	58.186	58.265	58.343	58.422	58.501	58.580	58.659
770	58.659	58.738	58.816	58.895	58.974	59.053	59.131	59.210	59.289	59.367	59.446
780	59.446	59.525	59.604	59.682	59.761	59.839	59.918	59.997	60.075	60.154	60.232
790	60.232	60.311	60.390	60.468	60.547	60.625	60.704	60.782	60.860	60.939	61.017
800	61.017	61.096	61.174	61.253	61.331	61.409	61.488	61.566	61.644	61.723	61.801
810	61.801	61.879	61.958	62.036	62.114	62.192	62.271	62.349	62.427	62.505	62.583
820	62.583	62.662	62.740	62.818	62.896	62.974	63.052	63.130	63.208	63.286	63.364
830	63.364	63.442	63.520	63.598	63.676	63.754	63.832	63.910	63.988	64.066	64.144
840	64.144	64.222	64.300	64.377	64.455	64.533	64.611	64.689	64.766	64.844	64.922
850	64.922	65.000	65.077	65.155	65.233	65.310	65.388	65.465	65.543	65.621	65.698
860	65.698	65.776	65.853	65.931	66.008	66.086	66.163	66.241	66.318	66.396	66.473
870	66.473	66.550	66.628	66.705	66.782	66.860	66.937	67.014	67.092	67.169	67.246
880	67.246	67.323	67.400	67.478	67.555	67.632	67.709	67.786	67.863	67.940	68.017
890	68.017	68.094	68.171	68.248	68.325	68.402	68.479	68.556	68.633	68.710	68.787
900	68.787	68.863	68.940	69.017	69.094	69.171	69.247	69.324	69.401	69.477	69.554
910	69.554	69.631	69.707	69.784	69.860	69.937	70.013	70.090	70.166	70.243	70.319
920	70.319	70.396	70.472	70.548	70.625	70.701	70.777	70.854	70.930	71.006	71.082
930	71.082	71.159	71.235	71.311	71.387	71.463	71.539	71.615	71.692	71.768	71.844
940	71.844	71.920	71.996	72.072	72.147	72.223	72.299	72.375	72.451	72.527	72.603
950	72.603	72.678	72.754	72.830	72.906	72.981	73.057	73.133	73.208	73.284	73.360
960	73.360	73.435	73.511	73.586	73.662	73.738	73.813	73.889	73.964	74.040	74.115
970	74.115	74.190	74.266	74.341	74.417	74.492	74.567	74.643	74.718	74.793	74.869
980	74.869	74.944	75.019	75.095	75.170	75.245	75.320	75.395	75.471	75.546	75.621
990	75.621	75.696	75.771	75.847	75.922	75.997	76.072	76.147	76.223	76.298	76.373
1000	76.373										

Termopar tipo J - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-210	-8.095										
-200	-7.890	-7.912	-7.934	-7.955	-7.976	-7.996	-8.017	-8.037	-8.057	-8.076	-8.095
-190	-7.659	-7.683	-7.707	-7.731	-7.755	-7.778	-7.801	-7.824	-7.846	-7.868	-7.890
-180	-7.403	-7.429	-7.456	-7.482	-7.508	-7.534	-7.559	-7.585	-7.610	-7.634	-7.659
-170	-7.123	-7.152	-7.181	-7.209	-7.237	-7.265	-7.293	-7.321	-7.348	-7.376	-7.403
-160	-6.821	-6.853	-6.883	-6.914	-6.944	-6.975	-7.005	-7.035	-7.064	-7.094	-7.123
-150	-6.500	-6.533	-6.566	-6.598	-6.631	-6.663	-6.695	-6.727	-6.759	-6.790	-6.821

Termopar tipo J - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-140	-6.159	-6.194	-6.229	-6.263	-6.298	-6.332	-6.366	-6.400	-6.433	-6.467	-6.500
-130	-5.801	-5.838	-5.874	-5.910	-5.946	-5.982	-6.018	-6.054	-6.089	-6.124	-6.159
-120	-5.426	-5.465	-5.503	-5.541	-5.578	-5.616	-5.653	-5.690	-5.727	-5.764	-5.801
-110	-5.037	-5.076	-5.116	-5.155	-5.194	-5.233	-5.272	-5.311	-5.350	-5.388	-5.426
-100	-4.633	-4.674	-4.714	-4.755	-4.796	-4.836	-4.877	-4.917	-4.957	-4.997	-5.037
-90	-4.215	-4.257	-4.300	-4.342	-4.384	-4.425	-4.467	-4.509	-4.550	-4.591	-4.633
-80	-3.786	-3.829	-3.872	-3.916	-3.959	-4.002	-4.045	-4.088	-4.130	-4.173	-4.215
-70	-3.344	-3.389	-3.434	-3.478	-3.522	-3.566	-3.610	-3.654	-3.698	-3.742	-3.786
-60	-2.893	-2.938	-2.984	-3.029	-3.075	-3.120	-3.165	-3.210	-3.255	-3.300	-3.344
-50	-2.431	-2.478	-2.524	-2.571	-2.617	-2.663	-2.709	-2.755	-2.801	-2.847	-2.893
-40	-1.961	-2.008	-2.055	-2.103	-2.150	-2.197	-2.244	-2.291	-2.338	-2.385	-2.431
-30	-1.482	-1.530	-1.578	-1.626	-1.674	-1.722	-1.770	-1.818	-1.865	-1.913	-1.961
-20	-0.995	-1.044	-1.093	-1.142	-1.190	-1.239	-1.288	-1.336	-1.385	-1.433	-1.482
-10	-0.501	-0.550	-0.600	-0.650	-0.699	-0.749	-0.798	-0.847	-0.896	-0.946	-0.995
0	0.000	-0.050	-0.101	-0.151	-0.201	-0.251	-0.301	-0.351	-0.401	-0.451	-0.501
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456	0.507
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.814	0.865	0.916	0.968	1.019
20	1.019	1.071	1.122	1.174	1.226	1.277	1.329	1.381	1.433	1.485	1.537
30	1.537	1.589	1.641	1.693	1.745	1.797	1.849	1.902	1.954	2.006	2.059
40	2.059	2.111	2.164	2.216	2.269	2.322	2.374	2.427	2.480	2.532	2.585
50	2.585	2.638	2.691	2.744	2.797	2.850	2.903	2.956	3.009	3.062	3.116
60	3.116	3.169	3.222	3.275	3.329	3.382	3.436	3.489	3.543	3.596	3.650
70	3.650	3.703	3.757	3.810	3.864	3.918	3.971	4.025	4.079	4.133	4.187
80	4.187	4.240	4.294	4.348	4.402	4.456	4.510	4.564	4.618	4.672	4.726
90	4.726	4.781	4.835	4.889	4.943	4.997	5.052	5.106	5.160	5.215	5.269
100	5.269	5.323	5.378	5.432	5.487	5.541	5.595	5.650	5.705	5.759	5.814
110	5.814	5.868	5.923	5.977	6.032	6.087	6.141	6.196	6.251	6.306	6.360
120	6.360	6.415	6.470	6.525	6.579	6.634	6.689	6.744	6.799	6.854	6.909
130	6.909	6.964	7.019	7.074	7.129	7.184	7.239	7.294	7.349	7.404	7.459
140	7.459	7.514	7.569	7.624	7.679	7.734	7.789	7.844	7.900	7.955	8.010
150	8.010	8.065	8.120	8.175	8.231	8.286	8.341	8.396	8.452	8.507	8.562
160	8.562	8.618	8.673	8.728	8.783	8.839	8.894	8.949	9.005	9.060	9.115
170	9.115	9.171	9.226	9.282	9.337	9.392	9.448	9.503	9.559	9.614	9.669
180	9.669	9.725	9.780	9.836	9.891	9.947	10.002	10.057	10.113	10.168	10.224
190	10.224	10.279	10.335	10.390	10.446	10.501	10.557	10.612	10.668	10.723	10.779
200	10.779	10.834	10.890	10.945	11.001	11.056	11.112	11.167	11.223	11.278	11.334
210	11.334	11.389	11.445	11.501	11.556	11.612	11.667	11.723	11.778	11.834	11.889
220	11.889	11.945	12.000	12.056	12.111	12.167	12.222	12.278	12.334	12.389	12.445
230	12.445	12.500	12.556	12.611	12.667	12.722	12.778	12.833	12.889	12.944	13.000
240	13.000	13.056	13.111	13.167	13.222	13.278	13.333	13.389	13.444	13.500	13.555
250	13.555	13.611	13.666	13.722	13.777	13.833	13.888	13.944	13.999	14.055	14.110
260	14.110	14.166	14.221	14.277	14.332	14.388	14.443	14.499	14.554	14.609	14.665
270	14.665	14.720	14.776	14.831	14.887	14.942	14.998	15.053	15.109	15.164	15.219

Termopar tipo J - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
280	15.219	15.275	15.330	15.386	15.441	15.496	15.552	15.607	15.663	15.718	15.773
290	15.773	15.829	15.884	15.940	15.995	16.050	16.106	16.161	16.216	16.272	16.327
300	16.327	16.383	16.438	16.493	16.549	16.604	16.659	16.715	16.770	16.825	16.881
310	16.881	16.936	16.991	17.046	17.102	17.157	17.212	17.268	17.323	17.378	17.434
320	17.434	17.489	17.544	17.599	17.655	17.710	17.765	17.820	17.876	17.931	17.986
330	17.986	18.041	18.097	18.152	18.207	18.262	18.318	18.373	18.428	18.483	18.538
340	18.538	18.594	18.649	18.704	18.759	18.814	18.870	18.925	18.980	19.035	19.090
350	19.090	19.146	19.201	19.256	19.311	19.366	19.422	19.477	19.532	19.587	19.642
360	19.642	19.697	19.753	19.808	19.863	19.918	19.973	20.028	20.083	20.139	20.194
370	20.194	20.249	20.304	20.359	20.414	20.469	20.525	20.580	20.635	20.690	20.745
380	20.745	20.800	20.855	20.911	20.966	21.021	21.076	21.131	21.186	21.241	21.297
390	21.297	21.352	21.407	21.462	21.517	21.572	21.627	21.683	21.738	21.793	21.848
400	21.848	21.903	21.958	22.014	22.069	22.124	22.179	22.234	22.289	22.345	22.400
410	22.400	22.455	22.510	22.565	22.620	22.676	22.731	22.786	22.841	22.896	22.952
420	22.952	23.007	23.062	23.117	23.172	23.228	23.283	23.338	23.393	23.449	23.504
430	23.504	23.559	23.614	23.670	23.725	23.780	23.835	23.891	23.946	24.001	24.057
440	24.057	24.112	24.167	24.223	24.278	24.333	24.389	24.444	24.499	24.555	24.610
450	24.610	24.665	24.721	24.776	24.832	24.887	24.943	24.998	25.053	25.109	25.164
460	25.164	25.220	25.275	25.331	25.386	25.442	25.497	25.553	25.608	25.664	25.720
470	25.720	25.775	25.831	25.886	25.942	25.998	26.053	26.109	26.165	26.220	26.276
480	26.276	26.332	26.387	26.443	26.499	26.555	26.610	26.666	26.722	26.778	26.834
490	26.834	26.889	26.945	27.001	27.057	27.113	27.169	27.225	27.281	27.337	27.393
500	27.393	27.449	27.505	27.561	27.617	27.673	27.729	27.785	27.841	27.897	27.953
510	27.953	28.010	28.066	28.122	28.178	28.234	28.291	28.347	28.403	28.460	28.516
520	28.516	28.572	28.629	28.685	28.741	28.798	28.854	28.911	28.967	29.024	29.080
530	29.080	29.137	29.194	29.250	29.307	29.363	29.420	29.477	29.534	29.590	29.647
540	29.647	29.704	29.761	29.818	29.874	29.931	29.988	30.045	30.102	30.159	30.216
550	30.216	30.273	30.330	30.387	30.444	30.502	30.559	30.616	30.673	30.730	30.788
560	30.788	30.845	30.902	30.960	31.017	31.074	31.132	31.189	31.247	31.304	31.362
570	31.362	31.419	31.477	31.535	31.592	31.650	31.708	31.766	31.823	31.881	31.939
580	31.939	31.997	32.055	32.113	32.171	32.229	32.287	32.345	32.403	32.461	32.519
590	32.519	32.577	32.636	32.694	32.752	32.810	32.869	32.927	32.985	33.044	33.102
600	33.102	33.161	33.219	33.278	33.337	33.395	33.454	33.513	33.571	33.630	33.689
610	33.689	33.748	33.807	33.866	33.925	33.984	34.043	34.102	34.161	34.220	34.279
620	34.279	34.338	34.397	34.457	34.516	34.575	34.635	34.694	34.754	34.813	34.873
630	34.873	34.932	34.992	35.051	35.111	35.171	35.230	35.290	35.350	35.410	35.470
640	35.470	35.530	35.590	35.650	35.710	35.770	35.830	35.890	35.950	36.010	36.071
650	36.071	36.131	36.191	36.252	36.312	36.373	36.433	36.494	36.554	36.615	36.675
660	36.675	36.736	36.797	36.858	36.918	36.979	37.040	37.101	37.162	37.223	37.284
670	37.284	37.345	37.406	37.467	37.528	37.590	37.651	37.712	37.773	37.835	37.896
680	37.896	37.958	38.019	38.081	38.142	38.204	38.265	38.327	38.389	38.450	38.512
690	38.512	38.574	38.636	38.698	38.760	38.822	38.884	38.946	39.008	39.070	39.132
700	39.132	39.194	39.256	39.318	39.381	39.443	39.505	39.568	39.630	39.693	39.755

Termopar tipo J - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
710	39.755	39.818	39.880	39.943	40.005	40.068	40.131	40.193	40.256	40.319	40.382
720	40.382	40.445	40.508	40.570	40.633	40.696	40.759	40.822	40.886	40.949	41.012
730	41.012	41.075	41.138	41.201	41.265	41.328	41.391	41.455	41.518	41.581	41.645
740	41.645	41.708	41.772	41.835	41.899	41.962	42.026	42.090	42.153	42.217	42.281
750	42.281	42.344	42.408	42.472	42.536	42.599	42.663	42.727	42.791	42.855	42.919
760	42.919	42.983	43.047	43.111	43.175	43.239	43.303	43.367	43.431	43.495	43.559
770	43.559	43.624	43.688	43.752	43.817	43.881	43.945	44.010	44.074	44.139	44.203
780	44.203	44.267	44.332	44.396	44.461	44.525	44.590	44.655	44.719	44.784	44.848
790	44.848	44.913	44.977	45.042	45.107	45.171	45.236	45.301	45.365	45.430	45.494
800	45.494	45.559	45.624	45.688	45.753	45.818	45.882	45.947	46.011	46.076	46.141
810	46.141	46.205	46.270	46.334	46.399	46.464	46.528	46.593	46.657	46.722	46.786
820	46.786	46.851	46.915	46.980	47.044	47.109	47.173	47.238	47.302	47.367	47.431
830	47.431	47.495	47.560	47.624	47.688	47.753	47.817	47.881	47.946	48.010	48.074
840	48.074	48.138	48.202	48.267	48.331	48.395	48.459	48.523	48.587	48.651	48.715
850	48.715	48.779	48.843	48.907	48.971	49.034	49.098	49.162	49.226	49.290	49.353
860	49.353	49.417	49.481	49.544	49.608	49.672	49.735	49.799	49.862	49.926	49.989
870	49.989	50.052	50.116	50.179	50.243	50.306	50.369	50.432	50.495	50.559	50.622
880	50.622	50.685	50.748	50.811	50.874	50.937	51.000	51.063	51.126	51.188	51.251
890	51.251	51.314	51.377	51.439	51.502	51.565	51.627	51.690	51.752	51.815	51.877
900	51.877	51.940	52.002	52.064	52.127	52.189	52.251	52.314	52.376	52.438	52.500
910	52.500	52.562	52.624	52.686	52.748	52.810	52.872	52.934	52.996	53.057	53.119
920	53.119	53.181	53.243	53.304	53.366	53.427	53.489	53.550	53.612	53.673	53.735
930	53.735	53.796	53.857	53.919	53.980	54.041	54.102	54.164	54.225	54.286	54.347
940	54.347	54.408	54.469	54.530	54.591	54.652	54.713	54.773	54.834	54.895	54.956
950	54.956	55.016	55.077	55.138	55.198	55.259	55.319	55.380	55.440	55.501	55.561
960	55.561	55.622	55.682	55.742	55.803	55.863	55.923	55.983	56.043	56.104	56.164
970	56.164	56.224	56.284	56.344	56.404	56.464	56.524	56.584	56.643	56.703	56.763
980	56.763	56.823	56.883	56.942	57.002	57.062	57.121	57.181	57.240	57.300	57.360
990	57.360	57.419	57.479	57.538	57.597	57.657	57.716	57.776	57.835	57.894	57.953
1000	57.953	58.013	58.072	58.131	58.190	58.249	58.309	58.368	58.427	58.486	58.545
1010	58.545	58.604	58.663	58.722	58.781	58.840	58.899	58.957	59.016	59.075	59.134
1020	59.134	59.193	59.252	59.310	59.369	59.428	59.487	59.545	59.604	59.663	59.721
1030	59.721	59.780	59.838	59.897	59.956	60.014	60.073	60.131	60.190	60.248	60.307
1040	60.307	60.365	60.423	60.482	60.540	60.599	60.657	60.715	60.774	60.832	60.890
1050	60.890	60.949	61.007	61.065	61.123	61.182	61.240	61.298	61.356	61.415	61.473
1060	61.473	61.531	61.589	61.647	61.705	61.763	61.822	61.880	61.938	61.996	62.054
1070	62.054	62.112	62.170	62.228	62.286	62.344	62.402	62.460	62.518	62.576	62.634
1080	62.634	62.692	62.750	62.808	62.866	62.924	62.982	63.040	63.098	63.156	63.214
1090	63.214	63.271	63.329	63.387	63.445	63.503	63.561	63.619	63.677	63.734	63.792
1100	63.792	63.850	63.908	63.966	64.024	64.081	64.139	64.197	64.255	64.313	64.370
1110	64.370	64.428	64.486	64.544	64.602	64.659	64.717	64.775	64.833	64.890	64.948
1120	64.948	65.006	65.064	65.121	65.179	65.237	65.295	65.352	65.410	65.468	65.525
1130	65.525	65.583	65.641	65.699	65.756	65.814	65.872	65.929	65.987	66.045	66.102

Termopar tipo J - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1140	66.102	66.160	66.218	66.275	66.333	66.391	66.448	66.506	66.564	66.621	66.679
1150	66.679	66.737	66.794	66.852	66.910	66.967	67.025	67.082	67.140	67.198	67.255
1160	67.255	67.313	67.370	67.428	67.486	67.543	67.601	67.658	67.716	67.773	67.831
1170	67.831	67.888	67.946	68.003	68.061	68.119	68.176	68.234	68.291	68.348	68.406
1180	68.406	68.463	68.521	68.578	68.636	68.693	68.751	68.808	68.865	68.923	68.980
1190	68.980	69.037	69.095	69.152	69.209	69.267	69.324	69.381	69.439	69.496	69.553
1200	69.553										

Termopar tipo K - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-270	-6.458										
-260	-6.441	-6.444	-6.446	-6.448	-6.450	-6.452	-6.453	-6.455	-6.456	-6.457	-6.458
-250	-6.404	-6.408	-6.413	-6.417	-6.421	-6.425	-6.429	-6.432	-6.435	-6.438	-6.441
-240	-6.344	-6.351	-6.358	-6.364	-6.370	-6.377	-6.382	-6.388	-6.393	-6.399	-6.404
-230	-6.262	-6.271	-6.280	-6.289	-6.297	-6.306	-6.314	-6.322	-6.329	-6.337	-6.344
-220	-6.158	-6.170	-6.181	-6.192	-6.202	-6.213	-6.223	-6.233	-6.243	-6.252	-6.262
-210	-6.035	-6.048	-6.061	-6.074	-6.087	-6.099	-6.111	-6.123	-6.135	-6.147	-6.158
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021	-6.035
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.797	-5.813	-5.829	-5.845	-5.861	-5.876	-5.891
-180	-5.550	-5.569	-5.588	-5.606	-5.624	-5.642	-5.660	-5.678	-5.695	-5.713	-5.730
-170	-5.354	-5.374	-5.395	-5.415	-5.435	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531	-5.550
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.228	-5.250	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333	-5.354
-150	-4.913	-4.936	-4.960	-4.983	-5.006	-5.029	-5.052	-5.074	-5.097	-5.119	-5.141
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.744	-4.768	-4.793	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889	-4.913
-130	-4.411	-4.437	-4.463	-4.490	-4.516	-4.542	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644	-4.669
-120	-4.138	-4.166	-4.194	-4.221	-4.249	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384	-4.411
-110	-3.852	-3.882	-3.911	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.054	-4.082	-4.110	-4.138
-100	-3.554	-3.584	-3.614	-3.645	-3.675	-3.705	-3.734	-3.764	-3.794	-3.823	-3.852
-90	-3.243	-3.274	-3.306	-3.337	-3.368	-3.400	-3.431	-3.462	-3.492	-3.523	-3.554
-80	-2.920	-2.953	-2.986	-3.018	-3.050	-3.083	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211	-3.243
-70	-2.587	-2.620	-2.654	-2.688	-2.721	-2.755	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887	-2.920
-60	-2.243	-2.278	-2.312	-2.347	-2.382	-2.416	-2.450	-2.485	-2.519	-2.553	-2.587
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.103	-2.138	-2.173	-2.208	-2.243
-40	-1.527	-1.564	-1.600	-1.637	-1.673	-1.709	-1.745	-1.782	-1.818	-1.854	-1.889
-30	-1.156	-1.194	-1.231	-1.268	-1.305	-1.343	-1.380	-1.417	-1.453	-1.490	-1.527
-20	-0.778	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.006	-1.043	-1.081	-1.119	-1.156
-10	-0.392	-0.431	-0.470	-0.508	-0.547	-0.586	-0.624	-0.663	-0.701	-0.739	-0.778
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612

Termopar tipo K - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138
200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091
440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941

Termopar tipo K - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366
470	19.366	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792
480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218
490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644
500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071
510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.497
520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.924
530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350
540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776
550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.203
560	23.203	23.245	23.288	23.331	23.373	23.416	23.458	23.501	23.544	23.586	23.629
570	23.629	23.671	23.714	23.757	23.799	23.842	23.884	23.927	23.970	24.012	24.055
580	24.055	24.097	24.140	24.182	24.225	24.267	24.310	24.353	24.395	24.438	24.480
590	24.480	24.523	24.565	24.608	24.650	24.693	24.735	24.778	24.820	24.863	24.905
600	24.905	24.948	24.990	25.033	25.075	25.118	25.160	25.203	25.245	25.288	25.330
610	25.330	25.373	25.415	25.458	25.500	25.543	25.585	25.627	25.670	25.712	25.755
620	25.755	25.797	25.840	25.882	25.924	25.967	26.009	26.052	26.094	26.136	26.179
630	26.179	26.221	26.263	26.306	26.348	26.390	26.433	26.475	26.517	26.560	26.602
640	26.602	26.644	26.687	26.729	26.771	26.814	26.856	26.898	26.940	26.983	27.025
650	27.025	27.067	27.109	27.152	27.194	27.236	27.278	27.320	27.363	27.405	27.447
660	27.447	27.489	27.531	27.574	27.616	27.658	27.700	27.742	27.784	27.826	27.869
670	27.869	27.911	27.953	27.995	28.037	28.079	28.121	28.163	28.205	28.247	28.289
680	28.289	28.332	28.374	28.416	28.458	28.500	28.542	28.584	28.626	28.668	28.710
690	28.710	28.752	28.794	28.835	28.877	28.919	28.961	29.003	29.045	29.087	29.129
700	29.129	29.171	29.213	29.255	29.297	29.338	29.380	29.422	29.464	29.506	29.548
710	29.548	29.589	29.631	29.673	29.715	29.757	29.798	29.840	29.882	29.924	29.965
720	29.965	30.007	30.049	30.090	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341	30.382
730	30.382	30.424	30.466	30.507	30.549	30.590	30.632	30.674	30.715	30.757	30.798
740	30.798	30.840	30.881	30.923	30.964	31.006	31.047	31.089	31.130	31.172	31.213
750	31.213	31.255	31.296	31.338	31.379	31.421	31.462	31.504	31.545	31.586	31.628
760	31.628	31.669	31.710	31.752	31.793	31.834	31.876	31.917	31.958	32.000	32.041
770	32.041	32.082	32.124	32.165	32.206	32.247	32.289	32.330	32.371	32.412	32.453
780	32.453	32.495	32.536	32.577	32.618	32.659	32.700	32.742	32.783	32.824	32.865
790	32.865	32.906	32.947	32.988	33.029	33.070	33.111	33.152	33.193	33.234	33.275
800	33.275	33.316	33.357	33.398	33.439	33.480	33.521	33.562	33.603	33.644	33.685
810	33.685	33.726	33.767	33.808	33.848	33.889	33.930	33.971	34.012	34.053	34.093
820	34.093	34.134	34.175	34.216	34.257	34.297	34.338	34.379	34.420	34.460	34.501
830	34.501	34.542	34.582	34.623	34.664	34.704	34.745	34.786	34.826	34.867	34.908
840	34.908	34.948	34.989	35.029	35.070	35.110	35.151	35.192	35.232	35.273	35.313
850	35.313	35.354	35.394	35.435	35.475	35.516	35.556	35.596	35.637	35.677	35.718
860	35.718	35.758	35.798	35.839	35.879	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081	36.121
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.484	36.524

Termopar tipo K - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.685	36.725	36.765	36.805	36.845	36.885	36.925
890	36.925	36.965	37.006	37.046	37.086	37.126	37.166	37.206	37.246	37.286	37.326
900	37.326	37.366	37.406	37.446	37.486	37.526	37.566	37.606	37.646	37.686	37.725
910	37.725	37.765	37.805	37.845	37.885	37.925	37.965	38.005	38.044	38.084	38.124
920	38.124	38.164	38.204	38.243	38.283	38.323	38.363	38.402	38.442	38.482	38.522
930	38.522	38.561	38.601	38.641	38.680	38.720	38.760	38.799	38.839	38.878	38.918
940	38.918	38.958	38.997	39.037	39.076	39.116	39.155	39.195	39.235	39.274	39.314
950	39.314	39.353	39.393	39.432	39.471	39.511	39.550	39.590	39.629	39.669	39.708
960	39.708	39.747	39.787	39.826	39.866	39.905	39.944	39.984	40.023	40.062	40.101
970	40.101	40.141	40.180	40.219	40.259	40.298	40.337	40.376	40.415	40.455	40.494
980	40.494	40.533	40.572	40.611	40.651	40.690	40.729	40.768	40.807	40.846	40.885
990	40.885	40.924	40.963	41.002	41.042	41.081	41.120	41.159	41.198	41.237	41.276
1000	41.276	41.315	41.354	41.393	41.431	41.470	41.509	41.548	41.587	41.626	41.665
1010	41.665	41.704	41.743	41.781	41.820	41.859	41.898	41.937	41.976	42.014	42.053
1020	42.053	42.092	42.131	42.169	42.208	42.247	42.286	42.324	42.363	42.402	42.440
1030	42.440	42.479	42.518	42.556	42.595	42.633	42.672	42.711	42.749	42.788	42.826
1040	42.826	42.865	42.903	42.942	42.980	43.019	43.057	43.096	43.134	43.173	43.211
1050	43.211	43.250	43.288	43.327	43.365	43.403	43.442	43.480	43.518	43.557	43.595
1060	43.595	43.633	43.672	43.710	43.748	43.787	43.825	43.863	43.901	43.940	43.978
1070	43.978	44.016	44.054	44.092	44.130	44.169	44.207	44.245	44.283	44.321	44.359
1080	44.359	44.397	44.435	44.473	44.512	44.550	44.588	44.626	44.664	44.702	44.740
1090	44.740	44.778	44.816	44.853	44.891	44.929	44.967	45.005	45.043	45.081	45.119
1100	45.119	45.157	45.194	45.232	45.270	45.308	45.346	45.383	45.421	45.459	45.497
1110	45.497	45.534	45.572	45.610	45.647	45.685	45.723	45.760	45.798	45.836	45.873
1120	45.873	45.911	45.948	45.986	46.024	46.061	46.099	46.136	46.174	46.211	46.249
1130	46.249	46.286	46.324	46.361	46.398	46.436	46.473	46.511	46.548	46.585	46.623
1140	46.623	46.660	46.697	46.735	46.772	46.809	46.847	46.884	46.921	46.958	46.995
1150	46.995	47.033	47.070	47.107	47.144	47.181	47.218	47.256	47.293	47.330	47.367
1160	47.367	47.404	47.441	47.478	47.515	47.552	47.589	47.626	47.663	47.700	47.737
1170	47.737	47.774	47.811	47.848	47.884	47.921	47.958	47.995	48.032	48.069	48.105
1180	48.105	48.142	48.179	48.216	48.252	48.289	48.326	48.363	48.399	48.436	48.473
1190	48.473	48.509	48.546	48.582	48.619	48.656	48.692	48.729	48.765	48.802	48.838
1200	48.838	48.875	48.911	48.948	48.984	49.021	49.057	49.093	49.130	49.166	49.202
1210	49.202	49.239	49.275	49.311	49.348	49.384	49.420	49.456	49.493	49.529	49.565
1220	49.565	49.601	49.637	49.674	49.710	49.746	49.782	49.818	49.854	49.890	49.926
1230	49.926	49.962	49.998	50.034	50.070	50.106	50.142	50.178	50.214	50.250	50.286
1240	50.286	50.322	50.358	50.393	50.429	50.465	50.501	50.537	50.572	50.608	50.644
1250	50.644	50.680	50.715	50.751	50.787	50.822	50.858	50.894	50.929	50.965	51.000
1260	51.000	51.036	51.071	51.107	51.142	51.178	51.213	51.249	51.284	51.320	51.355
1270	51.355	51.391	51.426	51.461	51.497	51.532	51.567	51.603	51.638	51.673	51.708
1280	51.708	51.744	51.779	51.814	51.849	51.885	51.920	51.955	51.990	52.025	52.060
1290	52.060	52.095	52.130	52.165	52.200	52.235	52.270	52.305	52.340	52.375	52.410

Termopar tipo K - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1300	52.410	52.445	52.480	52.515	52.550	52.585	52.620	52.654	52.689	52.724	52.759
1310	52.759	52.794	52.828	52.863	52.898	52.932	52.967	53.002	53.037	53.071	53.106
1320	53.106	53.140	53.175	53.210	53.244	53.279	53.313	53.348	53.382	53.417	53.451
1330	53.451	53.486	53.520	53.555	53.589	53.623	53.658	53.692	53.727	53.761	53.795
1340	53.795	53.830	53.864	53.898	53.932	53.967	54.001	54.035	54.069	54.104	54.138
1350	54.138	54.172	54.206	54.240	54.274	54.308	54.343	54.377	54.411	54.445	54.479
1360	54.479	54.513	54.547	54.581	54.615	54.649	54.683	54.717	54.751	54.785	54.819
1370	54.819	54.852	54.886								

Termopar tipo N - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-270	-4.345										
-260	-4.336	-4.337	-4.339	-4.340	-4.341	-4.342	-4.343	-4.344	-4.344	-4.345	-4.345
-250	-4.313	-4.316	-4.319	-4.321	-4.324	-4.326	-4.328	-4.330	-4.332	-4.334	-4.336
-240	-4.277	-4.281	-4.285	-4.289	-4.293	-4.297	-4.300	-4.304	-4.307	-4.310	-4.313
-230	-4.226	-4.232	-4.238	-4.243	-4.248	-4.254	-4.258	-4.263	-4.268	-4.273	-4.277
-220	-4.162	-4.169	-4.176	-4.183	-4.189	-4.196	-4.202	-4.209	-4.215	-4.221	-4.226
-210	-4.083	-4.091	-4.100	-4.108	-4.116	-4.124	-4.132	-4.140	-4.147	-4.154	-4.162
-200	-3.990	-4.000	-4.010	-4.020	-4.029	-4.038	-4.048	-4.057	-4.066	-4.074	-4.083
-190	-3.884	-3.896	-3.907	-3.918	-3.928	-3.939	-3.950	-3.960	-3.970	-3.980	-3.990
-180	-3.766	-3.778	-3.790	-3.803	-3.815	-3.827	-3.838	-3.850	-3.862	-3.873	-3.884
-170	-3.634	-3.648	-3.662	-3.675	-3.688	-3.702	-3.715	-3.728	-3.740	-3.753	-3.766
-160	-3.491	-3.506	-3.521	-3.535	-3.550	-3.564	-3.578	-3.593	-3.607	-3.621	-3.634
-150	-3.336	-3.352	-3.368	-3.384	-3.400	-3.415	-3.431	-3.446	-3.461	-3.476	-3.491
-140	-3.171	-3.188	-3.205	-3.221	-3.238	-3.255	-3.271	-3.288	-3.304	-3.320	-3.336
-130	-2.994	-3.012	-3.030	-3.048	-3.066	-3.084	-3.101	-3.119	-3.136	-3.153	-3.171
-120	-2.808	-2.827	-2.846	-2.865	-2.883	-2.902	-2.921	-2.939	-2.958	-2.976	-2.994
-110	-2.612	-2.632	-2.652	-2.672	-2.691	-2.711	-2.730	-2.750	-2.769	-2.789	-2.808
-100	-2.407	-2.428	-2.448	-2.469	-2.490	-2.510	-2.531	-2.551	-2.571	-2.592	-2.612
-90	-2.193	-2.215	-2.237	-2.258	-2.280	-2.301	-2.322	-2.344	-2.365	-2.386	-2.407
-80	-1.972	-1.995	-2.017	-2.039	-2.062	-2.084	-2.106	-2.128	-2.150	-2.172	-2.193
-70	-1.744	-1.767	-1.790	-1.813	-1.836	-1.859	-1.882	-1.905	-1.927	-1.950	-1.972
-60	-1.509	-1.533	-1.557	-1.580	-1.604	-1.627	-1.651	-1.674	-1.698	-1.721	-1.744
-50	-1.269	-1.293	-1.317	-1.341	-1.366	-1.390	-1.414	-1.438	-1.462	-1.485	-1.509
-40	-1.023	-1.048	-1.072	-1.097	-1.122	-1.146	-1.171	-1.195	-1.220	-1.244	-1.269
-30	-0.772	-0.798	-0.823	-0.848	-0.873	-0.898	-0.923	-0.948	-0.973	-0.998	-1.023
-20	-0.518	-0.544	-0.569	-0.595	-0.620	-0.646	-0.671	-0.696	-0.722	-0.747	-0.772
-10	-0.260	-0.286	-0.312	-0.338	-0.364	-0.390	-0.415	-0.441	-0.467	-0.492	-0.518
0	0.000	-0.026	-0.052	-0.078	-0.104	-0.131	-0.157	-0.183	-0.209	-0.234	-0.260
0	0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.182	0.208	0.235	0.261
10	0.261	0.287	0.313	0.340	0.366	0.393	0.419	0.446	0.472	0.499	0.525
20	0.525	0.552	0.578	0.605	0.632	0.659	0.685	0.712	0.739	0.766	0.793
30	0.793	0.820	0.847	0.874	0.901	0.928	0.955	0.983	1.010	1.037	1.065

Termopar tipo N - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
40	1.065	1.092	1.119	1.147	1.174	1.202	1.229	1.257	1.284	1.312	1.340
50	1.340	1.368	1.395	1.423	1.451	1.479	1.507	1.535	1.563	1.591	1.619
60	1.619	1.647	1.675	1.703	1.732	1.760	1.788	1.817	1.845	1.873	1.902
70	1.902	1.930	1.959	1.988	2.016	2.045	2.074	2.102	2.131	2.160	2.189
80	2.189	2.218	2.247	2.276	2.305	2.334	2.363	2.392	2.421	2.450	2.480
90	2.480	2.509	2.538	2.568	2.597	2.626	2.656	2.685	2.715	2.744	2.774
100	2.774	2.804	2.833	2.863	2.893	2.923	2.953	2.983	3.012	3.042	3.072
110	3.072	3.102	3.133	3.163	3.193	3.223	3.253	3.283	3.314	3.344	3.374
120	3.374	3.405	3.435	3.466	3.496	3.527	3.557	3.588	3.619	3.649	3.680
130	3.680	3.711	3.742	3.772	3.803	3.834	3.865	3.896	3.927	3.958	3.989
140	3.989	4.020	4.051	4.083	4.114	4.145	4.176	4.208	4.239	4.270	4.302
150	4.302	4.333	4.365	4.396	4.428	4.459	4.491	4.523	4.554	4.586	4.618
160	4.618	4.650	4.681	4.713	4.745	4.777	4.809	4.841	4.873	4.905	4.937
170	4.937	4.969	5.001	5.033	5.066	5.098	5.130	5.162	5.195	5.227	5.259
180	5.259	5.292	5.324	5.357	5.389	5.422	5.454	5.487	5.520	5.552	5.585
190	5.585	5.618	5.650	5.683	5.716	5.749	5.782	5.815	5.847	5.880	5.913
200	5.913	5.946	5.979	6.013	6.046	6.079	6.112	6.145	6.178	6.211	6.245
210	6.245	6.278	6.311	6.345	6.378	6.411	6.445	6.478	6.512	6.545	6.579
220	6.579	6.612	6.646	6.680	6.713	6.747	6.781	6.814	6.848	6.882	6.916
230	6.916	6.949	6.983	7.017	7.051	7.085	7.119	7.153	7.187	7.221	7.255
240	7.255	7.289	7.323	7.357	7.392	7.426	7.460	7.494	7.528	7.563	7.597
250	7.597	7.631	7.666	7.700	7.734	7.769	7.803	7.838	7.872	7.907	7.941
260	7.941	7.976	8.010	8.045	8.080	8.114	8.149	8.184	8.218	8.253	8.288
270	8.288	8.323	8.358	8.392	8.427	8.462	8.497	8.532	8.567	8.602	8.637
280	8.637	8.672	8.707	8.742	8.777	8.812	8.847	8.882	8.918	8.953	8.988
290	8.988	9.023	9.058	9.094	9.129	9.164	9.200	9.235	9.270	9.306	9.341
300	9.341	9.377	9.412	9.448	9.483	9.519	9.554	9.590	9.625	9.661	9.696
310	9.696	9.732	9.768	9.803	9.839	9.875	9.910	9.946	9.982	10.018	10.054
320	10.054	10.089	10.125	10.161	10.197	10.233	10.269	10.305	10.341	10.377	10.413
330	10.413	10.449	10.485	10.521	10.557	10.593	10.629	10.665	10.701	10.737	10.774
340	10.774	10.810	10.846	10.882	10.918	10.955	10.991	11.027	11.064	11.100	11.136
350	11.136	11.173	11.209	11.245	11.282	11.318	11.355	11.391	11.428	11.464	11.501
360	11.501	11.537	11.574	11.610	11.647	11.683	11.720	11.757	11.793	11.830	11.867
370	11.867	11.903	11.940	11.977	12.013	12.050	12.087	12.124	12.160	12.197	12.234
380	12.234	12.271	12.308	12.345	12.382	12.418	12.455	12.492	12.529	12.566	12.603
390	12.603	12.640	12.677	12.714	12.751	12.788	12.825	12.862	12.899	12.937	12.974
400	12.974	13.011	13.048	13.085	13.122	13.159	13.197	13.234	13.271	13.308	13.346
410	13.346	13.383	13.420	13.457	13.495	13.532	13.569	13.607	13.644	13.682	13.719
420	13.719	13.756	13.794	13.831	13.869	13.906	13.944	13.981	14.019	14.056	14.094
430	14.094	14.131	14.169	14.206	14.244	14.281	14.319	14.356	14.394	14.432	14.469
440	14.469	14.507	14.545	14.582	14.620	14.658	14.695	14.733	14.771	14.809	14.846
450	14.846	14.884	14.922	14.960	14.998	15.035	15.073	15.111	15.149	15.187	15.225
460	15.225	15.262	15.300	15.338	15.376	15.414	15.452	15.490	15.528	15.566	15.604

Termopar tipo N - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
470	15.604	15.642	15.680	15.718	15.756	15.794	15.832	15.870	15.908	15.946	15.984
480	15.984	16.022	16.060	16.099	16.137	16.175	16.213	16.251	16.289	16.327	16.366
490	16.366	16.404	16.442	16.480	16.518	16.557	16.595	16.633	16.671	16.710	16.748
500	16.748	16.786	16.824	16.863	16.901	16.939	16.978	17.016	17.054	17.093	17.131
510	17.131	17.169	17.208	17.246	17.285	17.323	17.361	17.400	17.438	17.477	17.515
520	17.515	17.554	17.592	17.630	17.669	17.707	17.746	17.784	17.823	17.861	17.900
530	17.900	17.938	17.977	18.016	18.054	18.093	18.131	18.170	18.208	18.247	18.286
540	18.286	18.324	18.363	18.401	18.440	18.479	18.517	18.556	18.595	18.633	18.672
550	18.672	18.711	18.749	18.788	18.827	18.865	18.904	18.943	18.982	19.020	19.059
560	19.059	19.098	19.136	19.175	19.214	19.253	19.292	19.330	19.369	19.408	19.447
570	19.447	19.485	19.524	19.563	19.602	19.641	19.680	19.718	19.757	19.796	19.835
580	19.835	19.874	19.913	19.952	19.990	20.029	20.068	20.107	20.146	20.185	20.224
590	20.224	20.263	20.302	20.341	20.379	20.418	20.457	20.496	20.535	20.574	20.613
600	20.613	20.652	20.691	20.730	20.769	20.808	20.847	20.886	20.925	20.964	21.003
610	21.003	21.042	21.081	21.120	21.159	21.198	21.237	21.276	21.315	21.354	21.393
620	21.393	21.432	21.471	21.510	21.549	21.588	21.628	21.667	21.706	21.745	21.784
630	21.784	21.823	21.862	21.901	21.940	21.979	22.018	22.058	22.097	22.136	22.175
640	22.175	22.214	22.253	22.292	22.331	22.370	22.410	22.449	22.488	22.527	22.566
650	22.566	22.605	22.644	22.684	22.723	22.762	22.801	22.840	22.879	22.919	22.958
660	22.958	22.997	23.036	23.075	23.115	23.154	23.193	23.232	23.271	23.311	23.350
670	23.350	23.389	23.428	23.467	23.507	23.546	23.585	23.624	23.663	23.703	23.742
680	23.742	23.781	23.820	23.860	23.899	23.938	23.977	24.016	24.056	24.095	24.134
690	24.134	24.173	24.213	24.252	24.291	24.330	24.370	24.409	24.448	24.487	24.527
700	24.527	24.566	24.605	24.644	24.684	24.723	24.762	24.801	24.841	24.880	24.919
710	24.919	24.959	24.998	25.037	25.076	25.116	25.155	25.194	25.233	25.273	25.312
720	25.312	25.351	25.391	25.430	25.469	25.508	25.548	25.587	25.626	25.666	25.705
730	25.705	25.744	25.783	25.823	25.862	25.901	25.941	25.980	26.019	26.058	26.098
740	26.098	26.137	26.176	26.216	26.255	26.294	26.333	26.373	26.412	26.451	26.491
750	26.491	26.530	26.569	26.608	26.648	26.687	26.726	26.766	26.805	26.844	26.883
760	26.883	26.923	26.962	27.001	27.041	27.080	27.119	27.158	27.198	27.237	27.276
770	27.276	27.316	27.355	27.394	27.433	27.473	27.512	27.551	27.591	27.630	27.669
780	27.669	27.708	27.748	27.787	27.826	27.866	27.905	27.944	27.983	28.023	28.062
790	28.062	28.101	28.140	28.180	28.219	28.258	28.297	28.337	28.376	28.415	28.455
800	28.455	28.494	28.533	28.572	28.612	28.651	28.690	28.729	28.769	28.808	28.847
810	28.847	28.886	28.926	28.965	29.004	29.043	29.083	29.122	29.161	29.200	29.239
820	29.239	29.279	29.318	29.357	29.396	29.436	29.475	29.514	29.553	29.592	29.632
830	29.632	29.671	29.710	29.749	29.789	29.828	29.867	29.906	29.945	29.985	30.024
840	30.024	30.063	30.102	30.141	30.181	30.220	30.259	30.298	30.337	30.376	30.416
850	30.416	30.455	30.494	30.533	30.572	30.611	30.651	30.690	30.729	30.768	30.807
860	30.807	30.846	30.886	30.925	30.964	31.003	31.042	31.081	31.120	31.160	31.199
870	31.199	31.238	31.277	31.316	31.355	31.394	31.433	31.473	31.512	31.551	31.590
880	31.590	31.629	31.668	31.707	31.746	31.785	31.824	31.863	31.903	31.942	31.981
890	31.981	32.020	32.059	32.098	32.137	32.176	32.215	32.254	32.293	32.332	32.371

Termopar tipo N - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
900	32.371	32.410	32.449	32.488	32.527	32.566	32.605	32.644	32.683	32.722	32.761
910	32.761	32.800	32.839	32.878	32.917	32.956	32.995	33.034	33.073	33.112	33.151
920	33.151	33.190	33.229	33.268	33.307	33.346	33.385	33.424	33.463	33.502	33.541
930	33.541	33.580	33.619	33.658	33.697	33.736	33.774	33.813	33.852	33.891	33.930
940	33.930	33.969	34.008	34.047	34.086	34.124	34.163	34.202	34.241	34.280	34.319
950	34.319	34.358	34.396	34.435	34.474	34.513	34.552	34.591	34.629	34.668	34.707
960	34.707	34.746	34.785	34.823	34.862	34.901	34.940	34.979	35.017	35.056	35.095
970	35.095	35.134	35.172	35.211	35.250	35.289	35.327	35.366	35.405	35.444	35.482
980	35.482	35.521	35.560	35.598	35.637	35.676	35.714	35.753	35.792	35.831	35.869
990	35.869	35.908	35.946	35.985	36.024	36.062	36.101	36.140	36.178	36.217	36.256
1000	36.256	36.294	36.333	36.371	36.410	36.449	36.487	36.526	36.564	36.603	36.641
1010	36.641	36.680	36.718	36.757	36.796	36.834	36.873	36.911	36.950	36.988	37.027
1020	37.027	37.065	37.104	37.142	37.181	37.219	37.258	37.296	37.334	37.373	37.411
1030	37.411	37.450	37.488	37.527	37.565	37.603	37.642	37.680	37.719	37.757	37.795
1040	37.795	37.834	37.872	37.911	37.949	37.987	38.026	38.064	38.102	38.141	38.179
1050	38.179	38.217	38.256	38.294	38.332	38.370	38.409	38.447	38.485	38.524	38.562
1060	38.562	38.600	38.638	38.677	38.715	38.753	38.791	38.829	38.868	38.906	38.944
1070	38.944	38.982	39.020	39.059	39.097	39.135	39.173	39.211	39.249	39.287	39.326
1080	39.326	39.364	39.402	39.440	39.478	39.516	39.554	39.592	39.630	39.668	39.706
1090	39.706	39.744	39.783	39.821	39.859	39.897	39.935	39.973	40.011	40.049	40.087
1100	40.087	40.125	40.163	40.201	40.238	40.276	40.314	40.352	40.390	40.428	40.466
1110	40.466	40.504	40.542	40.580	40.618	40.655	40.693	40.731	40.769	40.807	40.845
1120	40.845	40.883	40.920	40.958	40.996	41.034	41.072	41.109	41.147	41.185	41.223
1130	41.223	41.260	41.298	41.336	41.374	41.411	41.449	41.487	41.525	41.562	41.600
1140	41.600	41.638	41.675	41.713	41.751	41.788	41.826	41.864	41.901	41.939	41.976
1150	41.976	42.014	42.052	42.089	42.127	42.164	42.202	42.239	42.277	42.314	42.352
1160	42.352	42.390	42.427	42.465	42.502	42.540	42.577	42.614	42.652	42.689	42.727
1170	42.727	42.764	42.802	42.839	42.877	42.914	42.951	42.989	43.026	43.064	43.101
1180	43.101	43.138	43.176	43.213	43.250	43.288	43.325	43.362	43.399	43.437	43.474
1190	43.474	43.511	43.549	43.586	43.623	43.660	43.698	43.735	43.772	43.809	43.846
1200	43.846	43.884	43.921	43.958	43.995	44.032	44.069	44.106	44.144	44.181	44.218
1210	44.218	44.255	44.292	44.329	44.366	44.403	44.440	44.477	44.514	44.551	44.588
1220	44.588	44.625	44.662	44.699	44.736	44.773	44.810	44.847	44.884	44.921	44.958
1230	44.958	44.995	45.032	45.069	45.105	45.142	45.179	45.216	45.253	45.290	45.326
1240	45.326	45.363	45.400	45.437	45.474	45.510	45.547	45.584	45.621	45.657	45.694
1250	45.694	45.731	45.767	45.804	45.841	45.877	45.914	45.951	45.987	46.024	46.060
1260	46.060	46.097	46.133	46.170	46.207	46.243	46.280	46.316	46.353	46.389	46.425
1270	46.425	46.462	46.498	46.535	46.571	46.608	46.644	46.680	46.717	46.753	46.789
1280	46.789	46.826	46.862	46.898	46.935	46.971	47.007	47.043	47.079	47.116	47.152
1290	47.152	47.188	47.224	47.260	47.296	47.333	47.369	47.405	47.441	47.477	47.513
1300	47.513										

Termopar tipo R - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	-0.226										
-40	-0.188	-0.192	-0.196	-0.200	-0.204	-0.208	-0.211	-0.215	-0.219	-0.223	-0.226
-30	-0.145	-0.150	-0.154	-0.158	-0.163	-0.167	-0.171	-0.175	-0.180	-0.184	-0.188
-20	-0.100	-0.105	-0.109	-0.114	-0.119	-0.123	-0.128	-0.132	-0.137	-0.141	-0.145
-10	-0.051	-0.056	-0.061	-0.066	-0.071	-0.076	-0.081	-0.086	-0.091	-0.095	-0.100
0	0.000	-0.005	-0.011	-0.016	-0.021	-0.026	-0.031	-0.036	-0.041	-0.046	-0.051
0	0.000	0.005	0.011	0.016	0.021	0.027	0.032	0.038	0.043	0.049	0.054
10	0.054	0.060	0.065	0.071	0.077	0.082	0.088	0.094	0.100	0.105	0.111
20	0.111	0.117	0.123	0.129	0.135	0.141	0.147	0.153	0.159	0.165	0.171
30	0.171	0.177	0.183	0.189	0.195	0.201	0.207	0.214	0.220	0.226	0.232
40	0.232	0.239	0.245	0.251	0.258	0.264	0.271	0.277	0.284	0.290	0.296
50	0.296	0.303	0.310	0.316	0.323	0.329	0.336	0.343	0.349	0.356	0.363
60	0.363	0.369	0.376	0.383	0.390	0.397	0.403	0.410	0.417	0.424	0.431
70	0.431	0.438	0.445	0.452	0.459	0.466	0.473	0.480	0.487	0.494	0.501
80	0.501	0.508	0.516	0.523	0.530	0.537	0.544	0.552	0.559	0.566	0.573
90	0.573	0.581	0.588	0.595	0.603	0.610	0.618	0.625	0.632	0.640	0.647
100	0.647	0.655	0.662	0.670	0.677	0.685	0.693	0.700	0.708	0.715	0.723
110	0.723	0.731	0.738	0.746	0.754	0.761	0.769	0.777	0.785	0.792	0.800
120	0.800	0.808	0.816	0.824	0.832	0.839	0.847	0.855	0.863	0.871	0.879
130	0.879	0.887	0.895	0.903	0.911	0.919	0.927	0.935	0.943	0.951	0.959
140	0.959	0.967	0.976	0.984	0.992	1.000	1.008	1.016	1.025	1.033	1.041
150	1.041	1.049	1.058	1.066	1.074	1.082	1.091	1.099	1.107	1.116	1.124
160	1.124	1.132	1.141	1.149	1.158	1.166	1.175	1.183	1.191	1.200	1.208
170	1.208	1.217	1.225	1.234	1.242	1.251	1.260	1.268	1.277	1.285	1.294
180	1.294	1.303	1.311	1.320	1.329	1.337	1.346	1.355	1.363	1.372	1.381
190	1.381	1.389	1.398	1.407	1.416	1.425	1.433	1.442	1.451	1.460	1.469
200	1.469	1.477	1.486	1.495	1.504	1.513	1.522	1.531	1.540	1.549	1.558
210	1.558	1.567	1.575	1.584	1.593	1.602	1.611	1.620	1.629	1.639	1.648
220	1.648	1.657	1.666	1.675	1.684	1.693	1.702	1.711	1.720	1.729	1.739
230	1.739	1.748	1.757	1.766	1.775	1.784	1.794	1.803	1.812	1.821	1.831
240	1.831	1.840	1.849	1.858	1.868	1.877	1.886	1.895	1.905	1.914	1.923
250	1.923	1.933	1.942	1.951	1.961	1.970	1.980	1.989	1.998	2.008	2.017
260	2.017	2.027	2.036	2.046	2.055	2.064	2.074	2.083	2.093	2.102	2.112
270	2.112	2.121	2.131	2.140	2.150	2.159	2.169	2.179	2.188	2.198	2.207
280	2.207	2.217	2.226	2.236	2.246	2.255	2.265	2.275	2.284	2.294	2.304
290	2.304	2.313	2.323	2.333	2.342	2.352	2.362	2.371	2.381	2.391	2.401
300	2.401	2.410	2.420	2.430	2.440	2.449	2.459	2.469	2.479	2.488	2.498
310	2.498	2.508	2.518	2.528	2.538	2.547	2.557	2.567	2.577	2.587	2.597
320	2.597	2.607	2.617	2.626	2.636	2.646	2.656	2.666	2.676	2.686	2.696
330	2.696	2.706	2.716	2.726	2.736	2.746	2.756	2.766	2.776	2.786	2.796
340	2.796	2.806	2.816	2.826	2.836	2.846	2.856	2.866	2.876	2.886	2.896
350	2.896	2.906	2.916	2.926	2.937	2.947	2.957	2.967	2.977	2.987	2.997
360	2.997	3.007	3.018	3.028	3.038	3.048	3.058	3.068	3.079	3.089	3.099

Termopar tipo R - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
370	3.099	3.109	3.119	3.130	3.140	3.150	3.160	3.171	3.181	3.191	3.201
380	3.201	3.212	3.222	3.232	3.242	3.253	3.263	3.273	3.284	3.294	3.304
390	3.304	3.315	3.325	3.335	3.346	3.356	3.366	3.377	3.387	3.397	3.408
400	3.408	3.418	3.428	3.439	3.449	3.460	3.470	3.480	3.491	3.501	3.512
410	3.512	3.522	3.533	3.543	3.553	3.564	3.574	3.585	3.595	3.606	3.616
420	3.616	3.627	3.637	3.648	3.658	3.669	3.679	3.690	3.700	3.711	3.721
430	3.721	3.732	3.742	3.753	3.764	3.774	3.785	3.795	3.806	3.816	3.827
440	3.827	3.838	3.848	3.859	3.869	3.880	3.891	3.901	3.912	3.922	3.933
450	3.933	3.944	3.954	3.965	3.976	3.986	3.997	4.008	4.018	4.029	4.040
460	4.040	4.050	4.061	4.072	4.083	4.093	4.104	4.115	4.125	4.136	4.147
470	4.147	4.158	4.168	4.179	4.190	4.201	4.211	4.222	4.233	4.244	4.255
480	4.255	4.265	4.276	4.287	4.298	4.309	4.319	4.330	4.341	4.352	4.363
490	4.363	4.373	4.384	4.395	4.406	4.417	4.428	4.439	4.449	4.460	4.471
500	4.471	4.482	4.493	4.504	4.515	4.526	4.537	4.548	4.558	4.569	4.580
510	4.580	4.591	4.602	4.613	4.624	4.635	4.646	4.657	4.668	4.679	4.690
520	4.690	4.701	4.712	4.723	4.734	4.745	4.756	4.767	4.778	4.789	4.800
530	4.800	4.811	4.822	4.833	4.844	4.855	4.866	4.877	4.888	4.899	4.910
540	4.910	4.922	4.933	4.944	4.955	4.966	4.977	4.988	4.999	5.010	5.021
550	5.021	5.033	5.044	5.055	5.066	5.077	5.088	5.099	5.111	5.122	5.133
560	5.133	5.144	5.155	5.166	5.178	5.189	5.200	5.211	5.222	5.234	5.245
570	5.245	5.256	5.267	5.279	5.290	5.301	5.312	5.323	5.335	5.346	5.357
580	5.357	5.369	5.380	5.391	5.402	5.414	5.425	5.436	5.448	5.459	5.470
590	5.470	5.481	5.493	5.504	5.515	5.527	5.538	5.549	5.561	5.572	5.583
600	5.583	5.595	5.606	5.618	5.629	5.640	5.652	5.663	5.674	5.686	5.697
610	5.697	5.709	5.720	5.731	5.743	5.754	5.766	5.777	5.789	5.800	5.812
620	5.812	5.823	5.834	5.846	5.857	5.869	5.880	5.892	5.903	5.915	5.926
630	5.926	5.938	5.949	5.961	5.972	5.984	5.995	6.007	6.018	6.030	6.041
640	6.041	6.053	6.065	6.076	6.088	6.099	6.111	6.122	6.134	6.146	6.157
650	6.157	6.169	6.180	6.192	6.204	6.215	6.227	6.238	6.250	6.262	6.273
660	6.273	6.285	6.297	6.308	6.320	6.332	6.343	6.355	6.367	6.378	6.390
670	6.390	6.402	6.413	6.425	6.437	6.448	6.460	6.472	6.484	6.495	6.507
680	6.507	6.519	6.531	6.542	6.554	6.566	6.578	6.589	6.601	6.613	6.625
690	6.625	6.636	6.648	6.660	6.672	6.684	6.695	6.707	6.719	6.731	6.743
700	6.743	6.755	6.766	6.778	6.790	6.802	6.814	6.826	6.838	6.849	6.861
710	6.861	6.873	6.885	6.897	6.909	6.921	6.933	6.945	6.956	6.968	6.980
720	6.980	6.992	7.004	7.016	7.028	7.040	7.052	7.064	7.076	7.088	7.100
730	7.100	7.112	7.124	7.136	7.148	7.160	7.172	7.184	7.196	7.208	7.220
740	7.220	7.232	7.244	7.256	7.268	7.280	7.292	7.304	7.316	7.328	7.340
750	7.340	7.352	7.364	7.376	7.389	7.401	7.413	7.425	7.437	7.449	7.461
760	7.461	7.473	7.485	7.498	7.510	7.522	7.534	7.546	7.558	7.570	7.583
770	7.583	7.595	7.607	7.619	7.631	7.644	7.656	7.668	7.680	7.692	7.705
780	7.705	7.717	7.729	7.741	7.753	7.766	7.778	7.790	7.802	7.815	7.827
790	7.827	7.839	7.851	7.864	7.876	7.888	7.901	7.913	7.925	7.938	7.950

Termopar tipo R - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
800	7.950	7.962	7.974	7.987	7.999	8.011	8.024	8.036	8.048	8.061	8.073
810	8.073	8.086	8.098	8.110	8.123	8.135	8.147	8.160	8.172	8.185	8.197
820	8.197	8.209	8.222	8.234	8.247	8.259	8.272	8.284	8.296	8.309	8.321
830	8.321	8.334	8.346	8.359	8.371	8.384	8.396	8.409	8.421	8.434	8.446
840	8.446	8.459	8.471	8.484	8.496	8.509	8.521	8.534	8.546	8.559	8.571
850	8.571	8.584	8.597	8.609	8.622	8.634	8.647	8.659	8.672	8.685	8.697
860	8.697	8.710	8.722	8.735	8.748	8.760	8.773	8.785	8.798	8.811	8.823
870	8.823	8.836	8.849	8.861	8.874	8.887	8.899	8.912	8.925	8.937	8.950
880	8.950	8.963	8.975	8.988	9.001	9.014	9.026	9.039	9.052	9.065	9.077
890	9.077	9.090	9.103	9.115	9.128	9.141	9.154	9.167	9.179	9.192	9.205
900	9.205	9.218	9.230	9.243	9.256	9.269	9.282	9.294	9.307	9.320	9.333
910	9.333	9.346	9.359	9.371	9.384	9.397	9.410	9.423	9.436	9.449	9.461
920	9.461	9.474	9.487	9.500	9.513	9.526	9.539	9.552	9.565	9.578	9.590
930	9.590	9.603	9.616	9.629	9.642	9.655	9.668	9.681	9.694	9.707	9.720
940	9.720	9.733	9.746	9.759	9.772	9.785	9.798	9.811	9.824	9.837	9.850
950	9.850	9.863	9.876	9.889	9.902	9.915	9.928	9.941	9.954	9.967	9.980
960	9.980	9.993	10.006	10.019	10.032	10.046	10.059	10.072	10.085	10.098	10.111
970	10.111	10.124	10.137	10.150	10.163	10.177	10.190	10.203	10.216	10.229	10.242
980	10.242	10.255	10.268	10.282	10.295	10.308	10.321	10.334	10.347	10.361	10.374
990	10.374	10.387	10.400	10.413	10.427	10.440	10.453	10.466	10.480	10.493	10.506
1000	10.506	10.519	10.532	10.546	10.559	10.572	10.585	10.599	10.612	10.625	10.638
1010	10.638	10.652	10.665	10.678	10.692	10.705	10.718	10.731	10.745	10.758	10.771
1020	10.771	10.785	10.798	10.811	10.825	10.838	10.851	10.865	10.878	10.891	10.905
1030	10.905	10.918	10.932	10.945	10.958	10.972	10.985	10.998	11.012	11.025	11.039
1040	11.039	11.052	11.065	11.079	11.092	11.106	11.119	11.132	11.146	11.159	11.173
1050	11.173	11.186	11.200	11.213	11.227	11.240	11.253	11.267	11.280	11.294	11.307
1060	11.307	11.321	11.334	11.348	11.361	11.375	11.388	11.402	11.415	11.429	11.442
1070	11.442	11.456	11.469	11.483	11.496	11.510	11.524	11.537	11.551	11.564	11.578
1080	11.578	11.591	11.605	11.618	11.632	11.646	11.659	11.673	11.686	11.700	11.714
1090	11.714	11.727	11.741	11.754	11.768	11.782	11.795	11.809	11.822	11.836	11.850
1100	11.850	11.863	11.877	11.891	11.904	11.918	11.931	11.945	11.959	11.972	11.986
1110	11.986	12.000	12.013	12.027	12.041	12.054	12.068	12.082	12.096	12.109	12.123
1120	12.123	12.137	12.150	12.164	12.178	12.191	12.205	12.219	12.233	12.246	12.260
1130	12.260	12.274	12.288	12.301	12.315	12.329	12.342	12.356	12.370	12.384	12.397
1140	12.397	12.411	12.425	12.439	12.453	12.466	12.480	12.494	12.508	12.521	12.535
1150	12.535	12.549	12.563	12.577	12.590	12.604	12.618	12.632	12.646	12.659	12.673
1160	12.673	12.687	12.701	12.715	12.729	12.742	12.756	12.770	12.784	12.798	12.812
1170	12.812	12.825	12.839	12.853	12.867	12.881	12.895	12.909	12.922	12.936	12.950
1180	12.950	12.964	12.978	12.992	13.006	13.019	13.033	13.047	13.061	13.075	13.089
1190	13.089	13.103	13.117	13.131	13.145	13.158	13.172	13.186	13.200	13.214	13.228
1200	13.228	13.242	13.256	13.270	13.284	13.298	13.311	13.325	13.339	13.353	13.367
1210	13.367	13.381	13.395	13.409	13.423	13.437	13.451	13.465	13.479	13.493	13.507
1220	13.507	13.521	13.535	13.549	13.563	13.577	13.590	13.604	13.618	13.632	13.646

Termopar tipo R - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1230	13.646	13.660	13.674	13.688	13.702	13.716	13.730	13.744	13.758	13.772	13.786
1240	13.786	13.800	13.814	13.828	13.842	13.856	13.870	13.884	13.898	13.912	13.926
1250	13.926	13.940	13.954	13.968	13.982	13.996	14.010	14.024	14.038	14.052	14.066
1260	14.066	14.081	14.095	14.109	14.123	14.137	14.151	14.165	14.179	14.193	14.207
1270	14.207	14.221	14.235	14.249	14.263	14.277	14.291	14.305	14.319	14.333	14.347
1280	14.347	14.361	14.375	14.390	14.404	14.418	14.432	14.446	14.460	14.474	14.488
1290	14.488	14.502	14.516	14.530	14.544	14.558	14.572	14.586	14.601	14.615	14.629
1300	14.629	14.643	14.657	14.671	14.685	14.699	14.713	14.727	14.741	14.755	14.770
1310	14.770	14.784	14.798	14.812	14.826	14.840	14.854	14.868	14.882	14.896	14.911
1320	14.911	14.925	14.939	14.953	14.967	14.981	14.995	15.009	15.023	15.037	15.052
1330	15.052	15.066	15.080	15.094	15.108	15.122	15.136	15.150	15.164	15.179	15.193
1340	15.193	15.207	15.221	15.235	15.249	15.263	15.277	15.291	15.306	15.320	15.334
1350	15.334	15.348	15.362	15.376	15.390	15.404	15.419	15.433	15.447	15.461	15.475
1360	15.475	15.489	15.503	15.517	15.531	15.546	15.560	15.574	15.588	15.602	15.616
1370	15.616	15.630	15.645	15.659	15.673	15.687	15.701	15.715	15.729	15.743	15.758
1380	15.758	15.772	15.786	15.800	15.814	15.828	15.842	15.856	15.871	15.885	15.899
1390	15.899	15.913	15.927	15.941	15.955	15.969	15.984	15.998	16.012	16.026	16.040
1400	16.040	16.054	16.068	16.082	16.097	16.111	16.125	16.139	16.153	16.167	16.181
1410	16.181	16.196	16.210	16.224	16.238	16.252	16.266	16.280	16.294	16.309	16.323
1420	16.323	16.337	16.351	16.365	16.379	16.393	16.407	16.422	16.436	16.450	16.464
1430	16.464	16.478	16.492	16.506	16.520	16.534	16.549	16.563	16.577	16.591	16.605
1440	16.605	16.619	16.633	16.647	16.662	16.676	16.690	16.704	16.718	16.732	16.746
1450	16.746	16.760	16.774	16.789	16.803	16.817	16.831	16.845	16.859	16.873	16.887
1460	16.887	16.901	16.915	16.930	16.944	16.958	16.972	16.986	17.000	17.014	17.028
1470	17.028	17.042	17.056	17.071	17.085	17.099	17.113	17.127	17.141	17.155	17.169
1480	17.169	17.183	17.197	17.211	17.225	17.240	17.254	17.268	17.282	17.296	17.310
1490	17.310	17.324	17.338	17.352	17.366	17.380	17.394	17.408	17.423	17.437	17.451
1500	17.451	17.465	17.479	17.493	17.507	17.521	17.535	17.549	17.563	17.577	17.591
1510	17.591	17.605	17.619	17.633	17.647	17.661	17.676	17.690	17.704	17.718	17.732
1520	17.732	17.746	17.760	17.774	17.788	17.802	17.816	17.830	17.844	17.858	17.872
1530	17.872	17.886	17.900	17.914	17.928	17.942	17.956	17.970	17.984	17.998	18.012
1540	18.012	18.026	18.040	18.054	18.068	18.082	18.096	18.110	18.124	18.138	18.152
1550	18.152	18.166	18.180	18.194	18.208	18.222	18.236	18.250	18.264	18.278	18.292
1560	18.292	18.306	18.320	18.334	18.348	18.362	18.376	18.390	18.404	18.417	18.431
1570	18.431	18.445	18.459	18.473	18.487	18.501	18.515	18.529	18.543	18.557	18.571
1580	18.571	18.585	18.599	18.613	18.627	18.640	18.654	18.668	18.682	18.696	18.710
1590	18.710	18.724	18.738	18.752	18.766	18.779	18.793	18.807	18.821	18.835	18.849
1600	18.849	18.863	18.877	18.891	18.904	18.918	18.932	18.946	18.960	18.974	18.988
1610	18.988	19.002	19.015	19.029	19.043	19.057	19.071	19.085	19.098	19.112	19.126
1620	19.126	19.140	19.154	19.168	19.181	19.195	19.209	19.223	19.237	19.250	19.264
1630	19.264	19.278	19.292	19.306	19.319	19.333	19.347	19.361	19.375	19.388	19.402
1640	19.402	19.416	19.430	19.444	19.457	19.471	19.485	19.499	19.512	19.526	19.540
1650	19.540	19.554	19.567	19.581	19.595	19.609	19.622	19.636	19.650	19.663	19.677

Termopar tipo R - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1660	19.677	19.691	19.705	19.718	19.732	19.746	19.759	19.773	19.787	19.800	19.814
1670	19.814	19.828	19.841	19.855	19.869	19.882	19.896	19.910	19.923	19.937	19.951
1680	19.951	19.964	19.978	19.992	20.005	20.019	20.032	20.046	20.060	20.073	20.087
1690	20.087	20.100	20.114	20.127	20.141	20.154	20.168	20.181	20.195	20.208	20.222
1700	20.222	20.235	20.249	20.262	20.275	20.289	20.302	20.316	20.329	20.342	20.356
1710	20.356	20.369	20.382	20.396	20.409	20.422	20.436	20.449	20.462	20.475	20.488
1720	20.488	20.502	20.515	20.528	20.541	20.554	20.567	20.581	20.594	20.607	20.620
1730	20.620	20.633	20.646	20.659	20.672	20.685	20.698	20.711	20.724	20.736	20.749
1740	20.749	20.762	20.775	20.788	20.801	20.813	20.826	20.839	20.852	20.864	20.877
1750	20.877	20.890	20.902	20.915	20.928	20.940	20.953	20.965	20.978	20.990	21.003
1760	21.003	21.015	21.027	21.040	21.052	21.065	21.077	21.089	21.101		

Termopar tipo S - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	-0.236										
-40	-0.194	-0.199	-0.203	-0.207	-0.211	-0.215	-0.219	-0.224	-0.228	-0.232	-0.236
-30	-0.150	-0.155	-0.159	-0.164	-0.168	-0.173	-0.177	-0.181	-0.186	-0.190	-0.194
-20	-0.103	-0.108	-0.113	-0.117	-0.122	-0.127	-0.132	-0.136	-0.141	-0.146	-0.150
-10	-0.053	-0.058	-0.063	-0.068	-0.073	-0.078	-0.083	-0.088	-0.093	-0.098	-0.103
0	0.000	-0.005	-0.011	-0.016	-0.021	-0.027	-0.032	-0.037	-0.042	-0.048	-0.053
0	0.000	0.005	0.011	0.016	0.022	0.027	0.033	0.038	0.044	0.050	0.055
10	0.055	0.061	0.067	0.072	0.078	0.084	0.090	0.095	0.101	0.107	0.113
20	0.113	0.119	0.125	0.131	0.137	0.143	0.149	0.155	0.161	0.167	0.173
30	0.173	0.179	0.185	0.191	0.197	0.204	0.210	0.216	0.222	0.229	0.235
40	0.235	0.241	0.248	0.254	0.260	0.267	0.273	0.280	0.286	0.292	0.299
50	0.299	0.305	0.312	0.319	0.325	0.332	0.338	0.345	0.352	0.358	0.365
60	0.365	0.372	0.378	0.385	0.392	0.399	0.405	0.412	0.419	0.426	0.433
70	0.433	0.440	0.446	0.453	0.460	0.467	0.474	0.481	0.488	0.495	0.502
80	0.502	0.509	0.516	0.523	0.530	0.538	0.545	0.552	0.559	0.566	0.573
90	0.573	0.580	0.588	0.595	0.602	0.609	0.617	0.624	0.631	0.639	0.646
100	0.646	0.653	0.661	0.668	0.675	0.683	0.690	0.698	0.705	0.713	0.720
110	0.720	0.727	0.735	0.743	0.750	0.758	0.765	0.773	0.780	0.788	0.795
120	0.795	0.803	0.811	0.818	0.826	0.834	0.841	0.849	0.857	0.865	0.872
130	0.872	0.880	0.888	0.896	0.903	0.911	0.919	0.927	0.935	0.942	0.950
140	0.950	0.958	0.966	0.974	0.982	0.990	0.998	1.006	1.013	1.021	1.029
150	1.029	1.037	1.045	1.053	1.061	1.069	1.077	1.085	1.094	1.102	1.110
160	1.110	1.118	1.126	1.134	1.142	1.150	1.158	1.167	1.175	1.183	1.191
170	1.191	1.199	1.207	1.216	1.224	1.232	1.240	1.249	1.257	1.265	1.273
180	1.273	1.282	1.290	1.298	1.307	1.315	1.323	1.332	1.340	1.348	1.357
190	1.357	1.365	1.373	1.382	1.390	1.399	1.407	1.415	1.424	1.432	1.441
200	1.441	1.449	1.458	1.466	1.475	1.483	1.492	1.500	1.509	1.517	1.526
210	1.526	1.534	1.543	1.551	1.560	1.569	1.577	1.586	1.594	1.603	1.612
220	1.612	1.620	1.629	1.638	1.646	1.655	1.663	1.672	1.681	1.690	1.698

Termopar tipo S - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
230	1.698	1.707	1.716	1.724	1.733	1.742	1.751	1.759	1.768	1.777	1.786
240	1.786	1.794	1.803	1.812	1.821	1.829	1.838	1.847	1.856	1.865	1.874
250	1.874	1.882	1.891	1.900	1.909	1.918	1.927	1.936	1.944	1.953	1.962
260	1.962	1.971	1.980	1.989	1.998	2.007	2.016	2.025	2.034	2.043	2.052
270	2.052	2.061	2.070	2.078	2.087	2.096	2.105	2.114	2.123	2.132	2.141
280	2.141	2.151	2.160	2.169	2.178	2.187	2.196	2.205	2.214	2.223	2.232
290	2.232	2.241	2.250	2.259	2.268	2.277	2.287	2.296	2.305	2.314	2.323
300	2.323	2.332	2.341	2.350	2.360	2.369	2.378	2.387	2.396	2.405	2.415
310	2.415	2.424	2.433	2.442	2.451	2.461	2.470	2.479	2.488	2.497	2.507
320	2.507	2.516	2.525	2.534	2.544	2.553	2.562	2.571	2.581	2.590	2.599
330	2.599	2.609	2.618	2.627	2.636	2.646	2.655	2.664	2.674	2.683	2.692
340	2.692	2.702	2.711	2.720	2.730	2.739	2.748	2.758	2.767	2.776	2.786
350	2.786	2.795	2.805	2.814	2.823	2.833	2.842	2.851	2.861	2.870	2.880
360	2.880	2.889	2.899	2.908	2.917	2.927	2.936	2.946	2.955	2.965	2.974
370	2.974	2.983	2.993	3.002	3.012	3.021	3.031	3.040	3.050	3.059	3.069
380	3.069	3.078	3.088	3.097	3.107	3.116	3.126	3.135	3.145	3.154	3.164
390	3.164	3.173	3.183	3.192	3.202	3.212	3.221	3.231	3.240	3.250	3.259
400	3.259	3.269	3.279	3.288	3.298	3.307	3.317	3.326	3.336	3.346	3.355
410	3.355	3.365	3.374	3.384	3.394	3.403	3.413	3.423	3.432	3.442	3.451
420	3.451	3.461	3.471	3.480	3.490	3.500	3.509	3.519	3.529	3.538	3.548
430	3.548	3.558	3.567	3.577	3.587	3.596	3.606	3.616	3.626	3.635	3.645
440	3.645	3.655	3.664	3.674	3.684	3.694	3.703	3.713	3.723	3.732	3.742
450	3.742	3.752	3.762	3.771	3.781	3.791	3.801	3.810	3.820	3.830	3.840
460	3.840	3.850	3.859	3.869	3.879	3.889	3.898	3.908	3.918	3.928	3.938
470	3.938	3.947	3.957	3.967	3.977	3.987	3.997	4.006	4.016	4.026	4.036
480	4.036	4.046	4.056	4.065	4.075	4.085	4.095	4.105	4.115	4.125	4.134
490	4.134	4.144	4.154	4.164	4.174	4.184	4.194	4.204	4.213	4.223	4.233
500	4.233	4.243	4.253	4.263	4.273	4.283	4.293	4.303	4.313	4.323	4.332
510	4.332	4.342	4.352	4.362	4.372	4.382	4.392	4.402	4.412	4.422	4.432
520	4.432	4.442	4.452	4.462	4.472	4.482	4.492	4.502	4.512	4.522	4.532
530	4.532	4.542	4.552	4.562	4.572	4.582	4.592	4.602	4.612	4.622	4.632
540	4.632	4.642	4.652	4.662	4.672	4.682	4.692	4.702	4.712	4.722	4.732
550	4.732	4.742	4.752	4.762	4.772	4.782	4.793	4.803	4.813	4.823	4.833
560	4.833	4.843	4.853	4.863	4.873	4.883	4.893	4.904	4.914	4.924	4.934
570	4.934	4.944	4.954	4.964	4.974	4.984	4.995	5.005	5.015	5.025	5.035
580	5.035	5.045	5.055	5.066	5.076	5.086	5.096	5.106	5.116	5.127	5.137
590	5.137	5.147	5.157	5.167	5.178	5.188	5.198	5.208	5.218	5.228	5.239
600	5.239	5.249	5.259	5.269	5.280	5.290	5.300	5.310	5.320	5.331	5.341
610	5.341	5.351	5.361	5.372	5.382	5.392	5.402	5.413	5.423	5.433	5.443
620	5.443	5.454	5.464	5.474	5.485	5.495	5.505	5.515	5.526	5.536	5.546
630	5.546	5.557	5.567	5.577	5.588	5.598	5.608	5.618	5.629	5.639	5.649
640	5.649	5.660	5.670	5.680	5.691	5.701	5.712	5.722	5.732	5.743	5.753
650	5.753	5.763	5.774	5.784	5.794	5.805	5.815	5.826	5.836	5.846	5.857

Termopar tipo S - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
660	5.857	5.867	5.878	5.888	5.898	5.909	5.919	5.930	5.940	5.950	5.961
670	5.961	5.971	5.982	5.992	6.003	6.013	6.024	6.034	6.044	6.055	6.065
680	6.065	6.076	6.086	6.097	6.107	6.118	6.128	6.139	6.149	6.160	6.170
690	6.170	6.181	6.191	6.202	6.212	6.223	6.233	6.244	6.254	6.265	6.275
700	6.275	6.286	6.296	6.307	6.317	6.328	6.338	6.349	6.360	6.370	6.381
710	6.381	6.391	6.402	6.412	6.423	6.434	6.444	6.455	6.465	6.476	6.486
720	6.486	6.497	6.508	6.518	6.529	6.539	6.550	6.561	6.571	6.582	6.593
730	6.593	6.603	6.614	6.624	6.635	6.646	6.656	6.667	6.678	6.688	6.699
740	6.699	6.710	6.720	6.731	6.742	6.752	6.763	6.774	6.784	6.795	6.806
750	6.806	6.817	6.827	6.838	6.849	6.859	6.870	6.881	6.892	6.902	6.913
760	6.913	6.924	6.934	6.945	6.956	6.967	6.977	6.988	6.999	7.010	7.020
770	7.020	7.031	7.042	7.053	7.064	7.074	7.085	7.096	7.107	7.117	7.128
780	7.128	7.139	7.150	7.161	7.172	7.182	7.193	7.204	7.215	7.226	7.236
790	7.236	7.247	7.258	7.269	7.280	7.291	7.302	7.312	7.323	7.334	7.345
800	7.345	7.356	7.367	7.378	7.388	7.399	7.410	7.421	7.432	7.443	7.454
810	7.454	7.465	7.476	7.487	7.497	7.508	7.519	7.530	7.541	7.552	7.563
820	7.563	7.574	7.585	7.596	7.607	7.618	7.629	7.640	7.651	7.662	7.673
830	7.673	7.684	7.695	7.706	7.717	7.728	7.739	7.750	7.761	7.772	7.783
840	7.783	7.794	7.805	7.816	7.827	7.838	7.849	7.860	7.871	7.882	7.893
850	7.893	7.904	7.915	7.926	7.937	7.948	7.959	7.970	7.981	7.992	8.003
860	8.003	8.014	8.026	8.037	8.048	8.059	8.070	8.081	8.092	8.103	8.114
870	8.114	8.125	8.137	8.148	8.159	8.170	8.181	8.192	8.203	8.214	8.226
880	8.226	8.237	8.248	8.259	8.270	8.281	8.293	8.304	8.315	8.326	8.337
890	8.337	8.348	8.360	8.371	8.382	8.393	8.404	8.416	8.427	8.438	8.449
900	8.449	8.460	8.472	8.483	8.494	8.505	8.517	8.528	8.539	8.550	8.562
910	8.562	8.573	8.584	8.595	8.607	8.618	8.629	8.640	8.652	8.663	8.674
920	8.674	8.685	8.697	8.708	8.719	8.731	8.742	8.753	8.765	8.776	8.787
930	8.787	8.798	8.810	8.821	8.832	8.844	8.855	8.866	8.878	8.889	8.900
940	8.900	8.912	8.923	8.935	8.946	8.957	8.969	8.980	8.991	9.003	9.014
950	9.014	9.025	9.037	9.048	9.060	9.071	9.082	9.094	9.105	9.117	9.128
960	9.128	9.139	9.151	9.162	9.174	9.185	9.197	9.208	9.219	9.231	9.242
970	9.242	9.254	9.265	9.277	9.288	9.300	9.311	9.323	9.334	9.345	9.357
980	9.357	9.368	9.380	9.391	9.403	9.414	9.426	9.437	9.449	9.460	9.472
990	9.472	9.483	9.495	9.506	9.518	9.529	9.541	9.552	9.564	9.576	9.587
1000	9.587	9.599	9.610	9.622	9.633	9.645	9.656	9.668	9.680	9.691	9.703
1010	9.703	9.714	9.726	9.737	9.749	9.761	9.772	9.784	9.795	9.807	9.819
1020	9.819	9.830	9.842	9.853	9.865	9.877	9.888	9.900	9.911	9.923	9.935
1030	9.935	9.946	9.958	9.970	9.981	9.993	10.005	10.016	10.028	10.040	10.051
1040	10.051	10.063	10.075	10.086	10.098	10.110	10.121	10.133	10.145	10.156	10.168
1050	10.168	10.180	10.191	10.203	10.215	10.227	10.238	10.250	10.262	10.273	10.285
1060	10.285	10.297	10.309	10.320	10.332	10.344	10.356	10.367	10.379	10.391	10.403
1070	10.403	10.414	10.426	10.438	10.450	10.461	10.473	10.485	10.497	10.509	10.520
1080	10.520	10.532	10.544	10.556	10.567	10.579	10.591	10.603	10.615	10.626	10.638

Termopar tipo S - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1090	10.638	10.650	10.662	10.674	10.686	10.697	10.709	10.721	10.733	10.745	10.757
1100	10.757	10.768	10.780	10.792	10.804	10.816	10.828	10.839	10.851	10.863	10.875
1110	10.875	10.887	10.899	10.911	10.922	10.934	10.946	10.958	10.970	10.982	10.994
1120	10.994	11.006	11.017	11.029	11.041	11.053	11.065	11.077	11.089	11.101	11.113
1130	11.113	11.125	11.136	11.148	11.160	11.172	11.184	11.196	11.208	11.220	11.232
1140	11.232	11.244	11.256	11.268	11.280	11.291	11.303	11.315	11.327	11.339	11.351
1150	11.351	11.363	11.375	11.387	11.399	11.411	11.423	11.435	11.447	11.459	11.471
1160	11.471	11.483	11.495	11.507	11.519	11.531	11.542	11.554	11.566	11.578	11.590
1170	11.590	11.602	11.614	11.626	11.638	11.650	11.662	11.674	11.686	11.698	11.710
1180	11.710	11.722	11.734	11.746	11.758	11.770	11.782	11.794	11.806	11.818	11.830
1190	11.830	11.842	11.854	11.866	11.878	11.890	11.902	11.914	11.926	11.939	11.951
1200	11.951	11.963	11.975	11.987	11.999	12.011	12.023	12.035	12.047	12.059	12.071
1210	12.071	12.083	12.095	12.107	12.119	12.131	12.143	12.155	12.167	12.179	12.191
1220	12.191	12.203	12.216	12.228	12.240	12.252	12.264	12.276	12.288	12.300	12.312
1230	12.312	12.324	12.336	12.348	12.360	12.372	12.384	12.397	12.409	12.421	12.433
1240	12.433	12.445	12.457	12.469	12.481	12.493	12.505	12.517	12.529	12.542	12.554
1250	12.554	12.566	12.578	12.590	12.602	12.614	12.626	12.638	12.650	12.662	12.675
1260	12.675	12.687	12.699	12.711	12.723	12.735	12.747	12.759	12.771	12.783	12.796
1270	12.796	12.808	12.820	12.832	12.844	12.856	12.868	12.880	12.892	12.905	12.917
1280	12.917	12.929	12.941	12.953	12.965	12.977	12.989	13.001	13.014	13.026	13.038
1290	13.038	13.050	13.062	13.074	13.086	13.098	13.111	13.123	13.135	13.147	13.159
1300	13.159	13.171	13.183	13.195	13.208	13.220	13.232	13.244	13.256	13.268	13.280
1310	13.280	13.292	13.305	13.317	13.329	13.341	13.353	13.365	13.377	13.390	13.402
1320	13.402	13.414	13.426	13.438	13.450	13.462	13.474	13.487	13.499	13.511	13.523
1330	13.523	13.535	13.547	13.559	13.572	13.584	13.596	13.608	13.620	13.632	13.644
1340	13.644	13.657	13.669	13.681	13.693	13.705	13.717	13.729	13.742	13.754	13.766
1350	13.766	13.778	13.790	13.802	13.814	13.826	13.839	13.851	13.863	13.875	13.887
1360	13.887	13.899	13.911	13.924	13.936	13.948	13.960	13.972	13.984	13.996	14.009
1370	14.009	14.021	14.033	14.045	14.057	14.069	14.081	14.094	14.106	14.118	14.130
1380	14.130	14.142	14.154	14.166	14.178	14.191	14.203	14.215	14.227	14.239	14.251
1390	14.251	14.263	14.276	14.288	14.300	14.312	14.324	14.336	14.348	14.360	14.373
1400	14.373	14.385	14.397	14.409	14.421	14.433	14.445	14.457	14.470	14.482	14.494
1410	14.494	14.506	14.518	14.530	14.542	14.554	14.567	14.579	14.591	14.603	14.615
1420	14.615	14.627	14.639	14.651	14.664	14.676	14.688	14.700	14.712	14.724	14.736
1430	14.736	14.748	14.760	14.773	14.785	14.797	14.809	14.821	14.833	14.845	14.857
1440	14.857	14.869	14.881	14.894	14.906	14.918	14.930	14.942	14.954	14.966	14.978
1450	14.978	14.990	15.002	15.015	15.027	15.039	15.051	15.063	15.075	15.087	15.099
1460	15.099	15.111	15.123	15.135	15.148	15.160	15.172	15.184	15.196	15.208	15.220
1470	15.220	15.232	15.244	15.256	15.268	15.280	15.292	15.304	15.317	15.329	15.341
1480	15.341	15.353	15.365	15.377	15.389	15.401	15.413	15.425	15.437	15.449	15.461
1490	15.461	15.473	15.485	15.497	15.509	15.521	15.534	15.546	15.558	15.570	15.582
1500	15.582	15.594	15.606	15.618	15.630	15.642	15.654	15.666	15.678	15.690	15.702
1510	15.702	15.714	15.726	15.738	15.750	15.762	15.774	15.786	15.798	15.810	15.822

Termopar tipo S - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1520	15.822	15.834	15.846	15.858	15.870	15.882	15.894	15.906	15.918	15.930	15.942
1530	15.942	15.954	15.966	15.978	15.990	16.002	16.014	16.026	16.038	16.050	16.062
1540	16.062	16.074	16.086	16.098	16.110	16.122	16.134	16.146	16.158	16.170	16.182
1550	16.182	16.194	16.205	16.217	16.229	16.241	16.253	16.265	16.277	16.289	16.301
1560	16.301	16.313	16.325	16.337	16.349	16.361	16.373	16.385	16.396	16.408	16.420
1570	16.420	16.432	16.444	16.456	16.468	16.480	16.492	16.504	16.516	16.527	16.539
1580	16.539	16.551	16.563	16.575	16.587	16.599	16.611	16.623	16.634	16.646	16.658
1590	16.658	16.670	16.682	16.694	16.706	16.718	16.729	16.741	16.753	16.765	16.777
1600	16.777	16.789	16.801	16.812	16.824	16.836	16.848	16.860	16.872	16.883	16.895
1610	16.895	16.907	16.919	16.931	16.943	16.954	16.966	16.978	16.990	17.002	17.013
1620	17.013	17.025	17.037	17.049	17.061	17.072	17.084	17.096	17.108	17.120	17.131
1630	17.131	17.143	17.155	17.167	17.178	17.190	17.202	17.214	17.225	17.237	17.249
1640	17.249	17.261	17.272	17.284	17.296	17.308	17.319	17.331	17.343	17.355	17.366
1650	17.366	17.378	17.390	17.401	17.413	17.425	17.437	17.448	17.460	17.472	17.483
1660	17.483	17.495	17.507	17.518	17.530	17.542	17.553	17.565	17.577	17.588	17.600
1670	17.600	17.612	17.623	17.635	17.647	17.658	17.670	17.682	17.693	17.705	17.717
1680	17.717	17.728	17.740	17.751	17.763	17.775	17.786	17.798	17.809	17.821	17.832
1690	17.832	17.844	17.855	17.867	17.878	17.890	17.901	17.913	17.924	17.936	17.947
1700	17.947	17.959	17.970	17.982	17.993	18.004	18.016	18.027	18.039	18.050	18.061
1710	18.061	18.073	18.084	18.095	18.107	18.118	18.129	18.140	18.152	18.163	18.174
1720	18.174	18.185	18.196	18.208	18.219	18.230	18.241	18.252	18.263	18.274	18.285
1730	18.285	18.297	18.308	18.319	18.330	18.341	18.352	18.362	18.373	18.384	18.395
1740	18.395	18.406	18.417	18.428	18.439	18.449	18.460	18.471	18.482	18.493	18.503
1750	18.503	18.514	18.525	18.535	18.546	18.557	18.567	18.578	18.588	18.599	18.609
1760	18.609	18.620	18.630	18.641	18.651	18.661	18.672	18.682	18.693		

Termopar tipo T - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-270	-6.258										
-260	-6.232	-6.236	-6.239	-6.242	-6.245	-6.248	-6.251	-6.253	-6.255	-6.256	-6.258
-250	-6.180	-6.187	-6.193	-6.198	-6.204	-6.209	-6.214	-6.219	-6.223	-6.228	-6.232
-240	-6.105	-6.114	-6.122	-6.130	-6.138	-6.146	-6.153	-6.160	-6.167	-6.174	-6.180
-230	-6.007	-6.017	-6.028	-6.038	-6.049	-6.059	-6.068	-6.078	-6.087	-6.096	-6.105
-220	-5.888	-5.901	-5.914	-5.926	-5.938	-5.950	-5.962	-5.973	-5.985	-5.996	-6.007
-210	-5.753	-5.767	-5.782	-5.795	-5.809	-5.823	-5.836	-5.850	-5.863	-5.876	-5.888
-200	-5.603	-5.619	-5.634	-5.650	-5.665	-5.680	-5.695	-5.710	-5.724	-5.739	-5.753
-190	-5.439	-5.456	-5.473	-5.489	-5.506	-5.523	-5.539	-5.555	-5.571	-5.587	-5.603
-180	-5.261	-5.279	-5.297	-5.316	-5.334	-5.351	-5.369	-5.387	-5.404	-5.421	-5.439
-170	-5.070	-5.089	-5.109	-5.128	-5.148	-5.167	-5.186	-5.205	-5.224	-5.242	-5.261
-160	-4.865	-4.886	-4.907	-4.928	-4.949	-4.969	-4.989	-5.010	-5.030	-5.050	-5.070
-150	-4.648	-4.671	-4.693	-4.715	-4.737	-4.759	-4.780	-4.802	-4.823	-4.844	-4.865
-140	-4.419	-4.443	-4.466	-4.489	-4.512	-4.535	-4.558	-4.581	-4.604	-4.626	-4.648
-130	-4.177	-4.202	-4.226	-4.251	-4.275	-4.300	-4.324	-4.348	-4.372	-4.395	-4.419

Termopar tipo T - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-120	-3.923	-3.949	-3.975	-4.000	-4.026	-4.052	-4.077	-4.102	-4.127	-4.152	-4.177
-110	-3.657	-3.684	-3.711	-3.738	-3.765	-3.791	-3.818	-3.844	-3.871	-3.897	-3.923
-100	-3.379	-3.407	-3.435	-3.463	-3.491	-3.519	-3.547	-3.574	-3.602	-3.629	-3.657
-90	-3.089	-3.118	-3.148	-3.177	-3.206	-3.235	-3.264	-3.293	-3.322	-3.350	-3.379
-80	-2.788	-2.818	-2.849	-2.879	-2.910	-2.940	-2.970	-3.000	-3.030	-3.059	-3.089
-70	-2.476	-2.507	-2.539	-2.571	-2.602	-2.633	-2.664	-2.695	-2.726	-2.757	-2.788
-60	-2.153	-2.186	-2.218	-2.251	-2.283	-2.316	-2.348	-2.380	-2.412	-2.444	-2.476
-50	-1.819	-1.853	-1.887	-1.920	-1.954	-1.987	-2.021	-2.054	-2.087	-2.120	-2.153
-40	-1.475	-1.510	-1.545	-1.579	-1.614	-1.648	-1.683	-1.717	-1.751	-1.785	-1.819
-30	-1.121	-1.157	-1.192	-1.228	-1.264	-1.299	-1.335	-1.370	-1.405	-1.440	-1.475
-20	-0.757	-0.794	-0.830	-0.867	-0.904	-0.940	-0.976	-1.013	-1.049	-1.085	-1.121
-10	-0.383	-0.421	-0.459	-0.496	-0.534	-0.571	-0.608	-0.646	-0.683	-0.720	-0.757
0	0.000	-0.039	-0.077	-0.116	-0.154	-0.193	-0.231	-0.269	-0.307	-0.345	-0.383
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.352	0.391
10	0.391	0.431	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749	0.790
20	0.790	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.033	1.074	1.114	1.155	1.196
30	1.196	1.238	1.279	1.320	1.362	1.403	1.445	1.486	1.528	1.570	1.612
40	1.612	1.654	1.696	1.738	1.780	1.823	1.865	1.908	1.950	1.993	2.036
50	2.036	2.079	2.122	2.165	2.208	2.251	2.294	2.338	2.381	2.425	2.468
60	2.468	2.512	2.556	2.600	2.643	2.687	2.732	2.776	2.820	2.864	2.909
70	2.909	2.953	2.998	3.043	3.087	3.132	3.177	3.222	3.267	3.312	3.358
80	3.358	3.403	3.448	3.494	3.539	3.585	3.631	3.677	3.722	3.768	3.814
90	3.814	3.860	3.907	3.953	3.999	4.046	4.092	4.138	4.185	4.232	4.279
100	4.279	4.325	4.372	4.419	4.466	4.513	4.561	4.608	4.655	4.702	4.750
110	4.750	4.798	4.845	4.893	4.941	4.988	5.036	5.084	5.132	5.180	5.228
120	5.228	5.277	5.325	5.373	5.422	5.470	5.519	5.567	5.616	5.665	5.714
130	5.714	5.763	5.812	5.861	5.910	5.959	6.008	6.057	6.107	6.156	6.206
140	6.206	6.255	6.305	6.355	6.404	6.454	6.504	6.554	6.604	6.654	6.704
150	6.704	6.754	6.805	6.855	6.905	6.956	7.006	7.057	7.107	7.158	7.209
160	7.209	7.260	7.310	7.361	7.412	7.463	7.515	7.566	7.617	7.668	7.720
170	7.720	7.771	7.823	7.874	7.926	7.977	8.029	8.081	8.133	8.185	8.237
180	8.237	8.289	8.341	8.393	8.445	8.497	8.550	8.602	8.654	8.707	8.759
190	8.759	8.812	8.865	8.917	8.970	9.023	9.076	9.129	9.182	9.235	9.288
200	9.288	9.341	9.395	9.448	9.501	9.555	9.608	9.662	9.715	9.769	9.822
210	9.822	9.876	9.930	9.984	10.038	10.092	10.146	10.200	10.254	10.308	10.362
220	10.362	10.417	10.471	10.525	10.580	10.634	10.689	10.743	10.798	10.853	10.907
230	10.907	10.962	11.017	11.072	11.127	11.182	11.237	11.292	11.347	11.403	11.458
240	11.458	11.513	11.569	11.624	11.680	11.735	11.791	11.846	11.902	11.958	12.013
250	12.013	12.069	12.125	12.181	12.237	12.293	12.349	12.405	12.461	12.518	12.574
260	12.574	12.630	12.687	12.743	12.799	12.856	12.912	12.969	13.026	13.082	13.139
270	13.139	13.196	13.253	13.310	13.366	13.423	13.480	13.537	13.595	13.652	13.709
280	13.709	13.766	13.823	13.881	13.938	13.995	14.053	14.110	14.168	14.226	14.283
290	14.283	14.341	14.399	14.456	14.514	14.572	14.630	14.688	14.746	14.804	14.862

Termopar tipo T - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
300	14.862	14.920	14.978	15.036	15.095	15.153	15.211	15.270	15.328	15.386	15.445
310	15.445	15.503	15.562	15.621	15.679	15.738	15.797	15.856	15.914	15.973	16.032
320	16.032	16.091	16.150	16.209	16.268	16.327	16.387	16.446	16.505	16.564	16.624
330	16.624	16.683	16.742	16.802	16.861	16.921	16.980	17.040	17.100	17.159	17.219
340	17.219	17.279	17.339	17.399	17.458	17.518	17.578	17.638	17.698	17.759	17.819
350	17.819	17.879	17.939	17.999	18.060	18.120	18.180	18.241	18.301	18.362	18.422
360	18.422	18.483	18.543	18.604	18.665	18.725	18.786	18.847	18.908	18.969	19.030
370	19.030	19.091	19.152	19.213	19.274	19.335	19.396	19.457	19.518	19.579	19.641
380	19.641	19.702	19.763	19.825	19.886	19.947	20.009	20.070	20.132	20.193	20.255
390	20.255	20.317	20.378	20.440	20.502	20.563	20.625	20.687	20.748	20.810	20.872
400	20.872										

Tablas 6.8 F. e. m. de los termopares en función de la temperatura (ºC) - Unión de referencia a 0 ºC

Funciones polinómicas f. e. m. - temperatura (NIST = *Nacional Institute of Standards and Testing*)

La función polinómica para los termopares, excepto el tipo K, es:

$$mV = \sum_{i=0}^{n} a_i \times T^i$$

con T en °C. Y para el termopar tipo K:

$$mV = \sum_{i=0}^{n} a_i \times T^i + a_0 \times e^{a_1 \times (T - a_2)^2}$$

Los coeficientes a_i se encuentran en la tabla 6.9. La función polinómica inversa determina la temperatura T (°C) a partir de la f.e.m. (mV) desarrollada por el termopar:

$$T(^{\circ} C) = \sum_{i=0}^{n} d_i \times (mV)^i$$

Es recomendable que el termopar disponga de un *muelle de empuje* para asegurar el contacto del elemento con el fondo de la vaina de protección y, de este modo, obtener una respuesta lo más rápida posible.

Los *termopares de superficie* (*Skin Points*) se utilizan para tomar la temperatura de una superficie (tubería, depósito, horno, etc.). Están embebidos en una lámina que puede curvarse y que se suelda a la tubería. En la mayoría de ocasiones no es deseable exponer los termopares (o los sensores de temperatura en general) directamente a las condiciones de un proceso. Por ello, se utilizan fundas o vainas de protección para evitar los daños causados por erosión, corrosión, abrasión, y por los procesos de alta presión, en forma parecida a la sonda de resistencia. Las vainas suelen ser de acero inox. 316.

El sensor debe ajustarse al máximo en la vaina, al objeto de lograr una mínima resistencia a la transferencia de calor y, por lo tanto, una máxima velocidad de transmisión de la temperatura. Incluso en los procesos de captación de temperatura de gases se opta, siempre que sea posible, por tener el sensor en contacto directo con los gases, sirviendo la vaina, exclusivamente, como elemento de protección mecánica.

Termopar tipo B					
Campo de medida (ºC)	Coeficientes		Campo de medida (ºC)	Coeficientes	
0 a 630,615	a0	0.000000000000E+00	630,615 a 1820	a0	-0.389381686210E+01
	a1	-0.246508183460E-03		a1	0.285717474700E-01
	a2	0.590404211710E-05		a2	-0.848851047850E-04
	a3	-0.132579316360E-08		a3	0.157852801640E-06
	a4	0.156682919010E-11		a4	-0.168353448640E-09
	a5	-0.169445292400E-14		a5	0.111097940130E-12
	a6	0.629903470940E-18		a6	-0.445154310330E-16
				a7	0.989756408210E-20
				a8	-0.937913302890E-24
Termopar tipo E					
Campo de medida (ºC)	Coeficientes		Campo de medida (ºC)	Coeficientes	
-270 a 0	a0	0.000000000000E+00	0 a 1000	a0	0.000000000000E+00
	a1	0.586655087080E-01		a1	0.586655087100E-01
	a2	0.454109771240E-04		a2	0.450322755820E-04
	a3	-0.779980486860E-06		a3	0.289084072120E-07
	a4	-0.258001608430E-07		a4	-0.330568966520E-09
	a5	-0.594525830570E-09		a5	0.650244032700E-12
	a6	-0.932140586670E-11		a6	-0.191974955040E-15
	a7	-0.102876055340E-12		a7	-0.125366004970E-17
	a8	-0.803701236210E-15		a8	0.214892175690E-20
	a9	-0.439794973910E-17		a9	-0.143880417820E-23
	a10	-0.164147763550E-19		a10	0.359608994810E-27
	a11	-0.396736195160E-22			
	a12	-0.558273287210E-25			
	a13	-0.346578420130E-28			
Termopar tipo J					
Campo de medida (ºC)	Coeficientes		Campo de medida (ºC)	Coeficientes	
-210 a 760	a0	0.000000000000E+00	760 a 1200	a0	0.296456256810E+03
	a1	0.503811878150E-01		a1	-0.149761277860E+01
	a2	0.304758369300E-04		a2	0.317871039240E-02
	a3	-0.856810657200E-07		a3	-0.318476867010E-05
	a4	0.132281952950E-09		a4	0.157208190040E-08
	a5	-0.170529583370E-12		a5	-0.306913690560E-12
	a6	0.209480906970E-15			
	a7	-0.125383953360E-18			
	a8	0.156317256970E-22			

Tabla 6.9 Coeficientes polinómicos para los termopares (Fuente: NIST, ASTN, IEC)

Termopar tipo K					
Campo de medida (ºC)	Coeficientes		Campo de medida (ºC)	Coeficientes	
-270 a 0	a0	0.000000000000E+00	0 a 1372	a0	-0.176004136860E-01
	a1	0.394501280250E-01		a1	0.389212049750E-01
	a2	0.236223735980E-04		a2	0.185587700320E-04
	a3	-0.328589067840E-06		a3	-0.994575928740E-07
	a4	-0.499048287770E-08		a4	0.318409457190E-09
	a5	-0.675090591730E-10		a5	-0.560728448890E-12
	a6	-0.574103274280E-12		a6	0.560750590590E-15
	a7	-0.310888728940E-14		a7	-0.320207200030E-18
	a8	-0.104516093650E-16		a8	0.971511471520E-22
	a9	-0.198892668780E-19		a9	-0.121047212750E-25
	a10	-0.163226974860E-22	Coeficientes Exponencial	a0	0.118597600000E+00
				a1	-0.118343200000E-03
				a2	0.126968600000E+03
Termopar tipo N					
Campo de medida (ºC)	Coeficientes		Campo de medida (ºC)	Coeficientes	
-270 a 0	a0	0.000000000000E+00	0 a 1300	a0	0.000000000000E+00
	a1	0.261591059620E-01		a1	0.259293946010E-01
	a2	0.109574842280E-04		a2	0.157101418800E-04
	a3	-0.938411115540E-07		a3	0.438256272370E-07
	a4	-0.464120397590E-10		a4	-0.252611697940E-09
	a5	-0.263033577160E-11		a5	0.643118193390E-12
	a6	-0.226534380030E-13		a6	-0.100634715190E-14
	a7	-0.760893007910E-16		a7	0.997453389920E-18
	a8	-0.934196678350E-19		a8	-0.608632456070E-21
				a9	0.208492293390E-24
				a10	-0.306821961510E-28
Termopar tipo R					
Campo de medida (ºC)	Coeficientes		Campo de medida (ºC)	Coeficientes	
-50 a 1064,180	a0	0.000000000000E+00	1064,180 a 1664,500	a0	0.295157925316E+01
	a1	0.528961729765E-02		a1	-0.252061251332E-02
	a2	0.139166589782E-04		a2	0.159564501865E-04
	a3	-0.238855693017E-07		a3	-0.764085947576E-08
	a4	0.356916001063E-10		a4	0.205305291024E-11
	a5	-0.462347666298E-13		a5	-0.293359668173E-15
	a6	0.500777441034E-16	1664,500 a 1768,100	a0	0.152232118209E+03
	a7	-0.373105886191E-19		a1	-0.268819888545E+00
	a8	0.157716482367E-22		a2	0.171280280471E-03
	a9	-0.281038625251E-26		a3	-0.345895706453E-07
				a4	-0.934633971046E-14

Tabla 6.9 continuación Coeficientes polinómicos para los termopares (Fuente: NIST, ASTN, IEC)

Termopar tipo S					
Campo de medida (ºC)	Coeficientes		Campo de medida (ºC)	Coeficientes	
-50 a 1064,180	a0	0.000000000000E+00	1064,180 a 1664,500	a0	0.132900444085E+01
	a1	0.540313308631E-02		a1	0.334509311344E-02
	a2	0.125934289740E-04		a2	0.654805192818E-05
	a3	-0.232477968689E-07		a3	-0.164856259209E-08
	a4	0.322028823036E-10		a4	0.129989605174E-13
	a5	-0.331465196389E-13	1664,500 a 1768,100	a0	0.146628232636E+03
	a6	0.255744251786E-16		a1	-0.258430516752E+00
	a7	-0.125068871393E-19		a2	0.163693574641E-03
	a8	0.271443176145E-23		a3	-0.330439046987E-07
				a4	-0.943223690612E-14

Termopar tipo T					
Campo de medida (ºC)	Coeficientes		Campo de medida (ºC)	Coeficientes	
-270 a 0	a0	0.000000000000E+00	0 a 400	a0	0.000000000000E+00
	a1	0.387481063640E-01		a1	0.387481063640E-01
	a2	0.441944343470E-04		a2	0.332922278800E-04
	a3	0.118443231050E-06		a3	0.206182434040E-06
	a4	0.200329735540E-07		a4	-0.218822568460E-08
	a5	0.901380195590E-09		a5	0.109968809280E-10
	a6	0.226511565930E-10		a6	-0.308157587720E-13
	a7	0.360711542050E-12		a7	0.454791352900E-16
	a8	0.384939398830E-14		a8	-0.275129016730E-19
	a9	0.282135219250E-16			
	a10	0.142515947790E-18			
	a11	0.487686622860E-21			
	a12	0.107955392700E-23			
	a13	0.139450270620E-26			
	a14	0.797951539270E-30			

Tabla 6.9 continuación Coeficientes polinómicos para los termopares (Fuente: NIST, ASTN, IEC)

Los errores debidos a la conducción del calor del fluido de la vaina se minimizan mediante la utilización de termopares de pequeño diámetro y mayor longitud (profundidad de inmersión de diez diámetros de vaina), materiales para la vaina que tengan baja conductividad térmica o consiguiendo altos coeficientes de convección de transmisión de calor entre el fluido y el termopar. Cuando los termopares directos convencionales no proporcionan una adecuada medida de la temperatura del fluido se pueden diseñar termopares angulados o curvos para mejorar aún más las medidas.

En aplicaciones especiales se emplean tubos de protección construidos con materiales metálicos o cerámicos tales como porcelana, grafito, óxido de aluminio, carburo de silicio, etc. Los tubos de

protección cerámicos se emplean cuando el termopar está expuesto a la acción directa de una llama, están presentes gases contaminantes, o bien cuando las temperaturas son superiores a las que pueden tolerar los tubos metálicos (baños de tratamientos térmicos).

Los termopares de platino, normalmente, precisan de un tubo cerámico que los proteja contra la contaminación de los gases de los hornos y otros gases reductores.

En la figura 6.20 pueden verse varios tipos de termopares con tubo de protección. El material del tubo de protección o vaina debe ser el adecuado para el proceso donde se aplica y suele ser de hierro, acero sin soldadura, acero inoxidable, inconel, cerámico, carburo de silicio, etc.

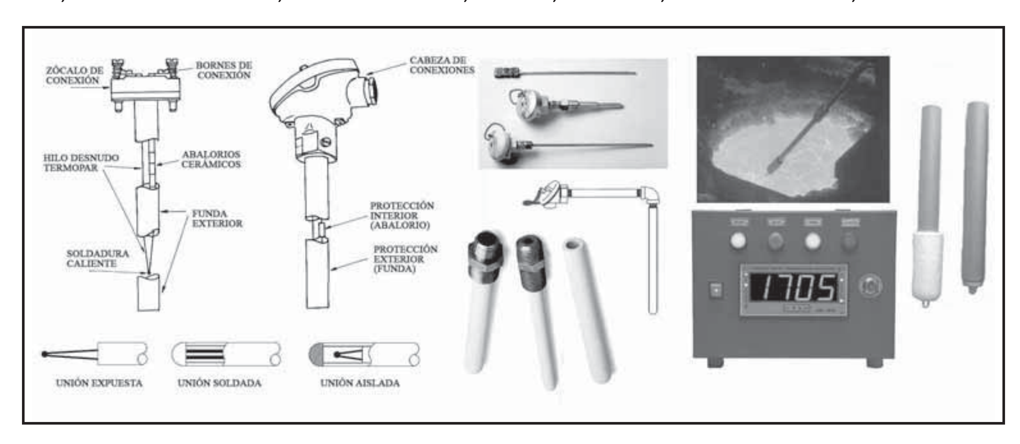


Figura 6.20 *Tubos de protección y vainas para termopares*

En la tabla 6.10 puede verse una guía para la selección de tubos o vainas de protección.

Cuando el termopar está instalado a una distancia larga del instrumento, no se conecta directamente al mismo, sino por medio de un cable de extensión o compensación (figura 6.21). Los cables de extensión son conductores con propiedades eléctricas similares a las del termopar a las temperaturas límites que pueden encontrarse en el proceso (0-200 °C) y son más económicos. El uso del cable de extensión es claro en el caso de termopares tipo R o S, debido al elevado precio del platino que encarecería el coste del hilo desde el campo hasta el panel.

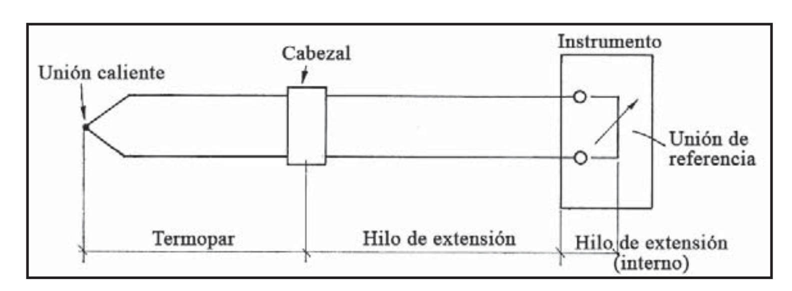


Figura 6.21 *Diagrama de un sistema pirométrico*

Se suelen utilizar los siguientes conductores:

- Conductores tipo J para termopares tipo J.
- Conductores tipo K o tipo T para termopares tipo K.

- Conductores tipo T para termopares tipo T.
- Conductores tipo E para termopares tipo E.
- Conductores cobre-cobre níquel para termopares tipos R, S o B.

Industria	*Aplicación*	*Tubo o vaina*
Tratamientos térmicos	Recocido	Inconel o hierro
	Carburación	Inconel
	Templado:	
	< 700° C	Hierro forjado
	700 a 1100° C	Inconel o hierro
	> 1100° C	Cerámico o pirómetro radiación
	Nitruración	Hierro
	Baños de sales	Inconel, hierro o pirómetro radiación
Hierro y acero	Hornos de soplado	Inconel o hierro o carburo de silicio
	Hogar	Inconel o pirómetro de radiación
	Techo	Pirómetro de radiación
	Calderas de recuperación	Inconel o hierro
	Fosos de recalentamiento	
	< 1100° C	Inconel o hierro
	> 1100° C	Cerámico y carburo de silicio o pirómetro de radiación
	Palanquilla, calentamiento de planchas y soldadura a tope	
	< 1100° C	Inconel o hierro
	> 1100° C	Cerámico y carburo de silicio o pirómetro de radiación
	Soldadura fuerte	Pirómetro de radiación
	Recocido brillante	Termopar tipo J sin tubo de protección o pirómetro de radiación
	Forjado	Cerámico y carburo de silicio o pirómetro de radiación
	Galvanización	Acero o carburo de silicio
	Baños de decapado	Plomo
	Estañado	Acero dulce o hierro
Metales no férricos	Fundición aluminio	Carburo de silicio o hierro
	Tratamiento térmico del aluminio	Hierro o sin tubo de protección
	Fundición latón o bronce	Metal fundido especial
	Recocido	Hierro o sin tubo de protección
	Palanquilla	Inconel o hierro
	Moldeo	Hierro o carburo de silicio
	Plomo	Hierro
	Magnesio	Acero sin soldadura
	Estaño	Acero dulce
	Cinc	Carburo de silicio o hierro
	Fundición y calcinación de mineral	Inconel, hierro, cerámico o carburo de silicio
Cemento	Conductos de salida	Inconel o hierro
	Horno	Pirómetro de radiación

Tabla 6.10 Guía de selección de tubos o vainas de protección

Industria	*Aplicación*	*Tubo o vaina*
Cerámica	Hornos Secadores Esmaltado vítreo	Cerámico o pirómetro de radiación Hierro Inconel, hierro o pirómetro de radiación
Química		Acero inoxidable en general. Debido a la gran variedad de aplicaciones químicas es difícil establecer recomendaciones
Alimentación		Acero inoxidable
Gas	Productor de gas Gas de agua sobrecalentado	Inconel o hierro Inconel o hierro
Vidrio	Alimentador Lehr (túnel de recocido) Tanques Conductos de tanques	Platino o pirómetro de radiación Hierro Cerámico o pirómetro de radiación Inconel o hierro
Petroquímica	Desparafinador Columna de fraccionamiento Cámara de reacción Unidades catalíticas Líneas de transferencia Torres Torre llamas	Acero inoxidable » » » » » » » » » » Inconel o hierro
Centrales térmicas	Conducto de gases Precalentadores Líneas de vapor Líneas de agua	Hierro Hierro Acero inoxidable Acero dulce
Varios	Incineradores hasta 1100° C superior a 1000° C	Inconel o hierro Cerámico y carburo de silicio

Tabla 6.10 continuación Guía de selección de tubos o vainas de protección

En la figura 6.22 pueden verse los códigos de colores de varios países.

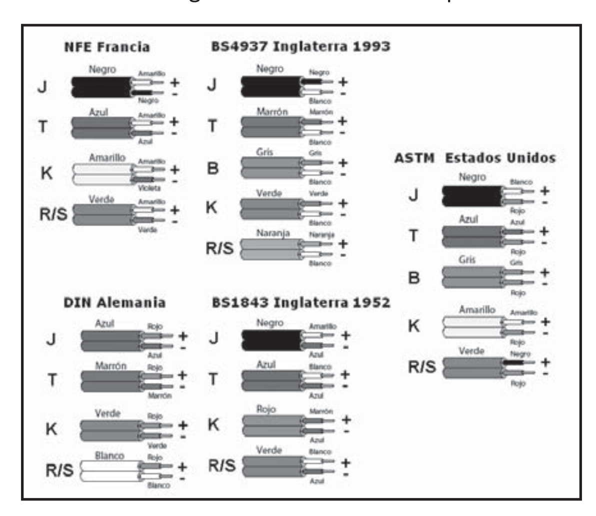


Figura 6.22 Colores de los cables de compensación

Las conexiones entre el cable de compensación, el termopar y el instrumento deben ser perfectas, sin empalmes en el cable de compensación, utilizando el hilo correcto y los conectores adecuados. El conjunto de la instalación debe evitar el paso próximo por fuentes de calor (aparece el efecto Thomson). El empalme de hilos distintos en el recorrido del cable del termopar va a formar una nueva unión cuya f.e.m. se va a oponer a la generada por la unión de medida (caso típico de la rotura del hilo del termopar en campo y su sustitución por hilo de cobre).

Si estas recomendaciones no se cumplen, aparecen tensiones térmicas de corriente continua que darán lugar a un desplazamiento en la lectura del instrumento de medida de la temperatura.

6.8.2 Compensación de la unión fría

Las tablas estándar de mV de los termopares están referidas con la unión fría a 0 °C, mientras que las conexiones en panel, o en campo, son variables y difieren de 0 °C. Por lo tanto, es necesario compensar las variaciones de la temperatura en la unión fría o de referencia del termopar.

En los instrumentos clásicos galvanométricos o potenciométricos, la compensación se realiza mediante una resistencia (resistencia de compensación de la unión fría), que absorbe una tensión equivalente a la f.e.m. que tendría el termopar con la unión caliente a la temperatura de la caja del instrumento y la unión fría a 0 °C. La resistencia varía linealmente con la temperatura, y el termopar se caracteriza por una relación temperatura - f.e.m. que no es lineal. Se obtiene así una compensación perfecta en sólo dos puntos, mientras que en los restantes la compensación, si bien no es perfecta, es más que suficiente en la mayor parte de las aplicaciones industriales. Cuando se desea una gran exactitud en la medida, o bien el instrumento no posee una resistencia de compensación interna, es necesario utilizar cajas exteriores de compensación instaladas, generalmente, en proceso y en cuyo interior se encuentra la unión de referencia. Estas cajas pueden ser de temperatura controlada o bien pueden compensar automáticamente las variaciones de temperatura ambiente.

En los instrumentos digitales se utilizan módulos de acondicionamiento que compensan, electrónicamente, el cambio de temperatura de la unión fría y que, además, linealizan, con relación a la temperatura, los mV generados por el termopar (figura 6.23)

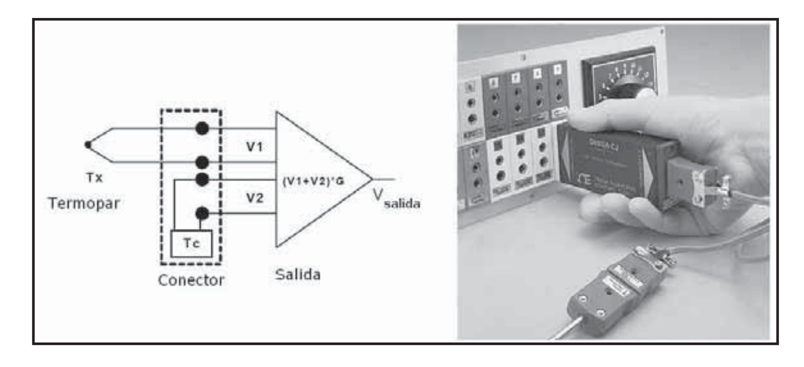


Figura 6.23 *Módulo de compensación de la unión fría del termopar. Fuente: Omega*

$V1$ es la f.e.m. (mV) generada por el termopar como diferencia entre la temperatura desconocida Tx y la temperatura del conector Tc. Esta última se determina mediante un sensor tal como un diodo, una sonda de resistencia, etc., y se inyecta como tensión $V2$ en el módulo de salida, de tal modo que representa electrónicamente la f.e.m. (mV) del mismo tipo de termopar cuya unión caliente estuviera

a la temperatura del conector Tc y la unión fría a 0 °C. De este modo, si la ganancia G del módulo de salida se hace la unidad, la tensión de salida del módulo de acondicionamiento será la suma de las dos f.e.m. (mV) $V1$ y $V2$, y representará la temperatura real del proceso.

Un microprocesador que disponga, por hardware o mediante un software, de las funciones polinómicas para los termopares de la tabla 6.8 dará, directamente, como señal de salida la temperatura real del proceso.

En la compensación por hardware se inserta, en el circuito, una fuente de tensión variable que genera un voltaje de compensación según la temperatura ambiente y que se suma al generado por el termopar con su unión fría a la temperatura ambiente. En la compensación por software, el programa suma el valor de tensión adecuado de compensación de acuerdo con las tablas de funciones polinómicas.

El termopar es susceptible al ruido eléctrico industrial debido a que durante su funcionamiento puede generar tensiones de 2 a 50 mV y se encuentra en un entorno donde las grandes máquinas eléctricas (motores, etc.) pueden crear cientos de milivoltios en el cable de conexión y las interferencias electromagnéticas de los teléfonos móviles pueden causar señales erráticas, incluso aunque el termopar se ponga a tierra o se aísle. De aquí, que se requiera que los cables de conexión estén torcidos y dentro de una funda metálica que se pone a tierra; que la unión de medida esté puesta a tierra. Si esto no es suficiente, es preferible instalar transmisores en campo que conviertan la señal de mV a 4-20 mA c.c., lo que reduce los problemas de ruido. Si el transmisor es inteligente, proporciona, además, una protección ante RFI y EMI y un aislamiento frente a sobretensiones o errores del lazo de control.

En la medición de las temperaturas elevadas que se encuentran en la fabricación de acero en fusión se emplean *cartuchos con termopares R o S* que se enchufan en una lanza. El operario sumerge ésta en acero y, aunque el cartucho se funde en unos segundos, da tiempo a que un circuito especial fije la máxima temperatura

Desde el punto de vista de control, y cuando se requiere más exactitud, se usan transmisores de temperatura de tipo inteligente, con salida directa analógica de 4-20 mA c.c. o digital con protocolo *HART*.

Los termopares están conectados a un circuito galvanométrico o uno potenciométrico clásicos, o bien a un circuito equivalente digital.

6.8.3 Circuitos galvanométrico, potenciómetrico y digital

El *circuito galvanométrico* se basa en la desviación de una bobina situada entre dos polos de un imán permanente, al pasar la corriente del elemento primario a su través (figura 6.24a). El paso de esta corriente produce un campo magnético que se opone al del imán permanente, y la bobina móvil gira hasta que el par magnético correspondiente es equilibrado por el par de tensión del muelle.

Una aguja indicadora, que está unida rígidamente a la bobina móvil, se desplaza a lo largo de una escala graduada, calibrada en las unidades de medida. Las variaciones de temperatura pueden influir en la resistencia eléctrica del circuito de medida, y para anularlas se utiliza una resistencia de coeficiente de temperatura negativo (NTC), llamada resistencia de compensación. Asimismo, los cables de conexión al termopar pueden variar de resistencia con la temperatura y afectar a la exactitud de la medida.

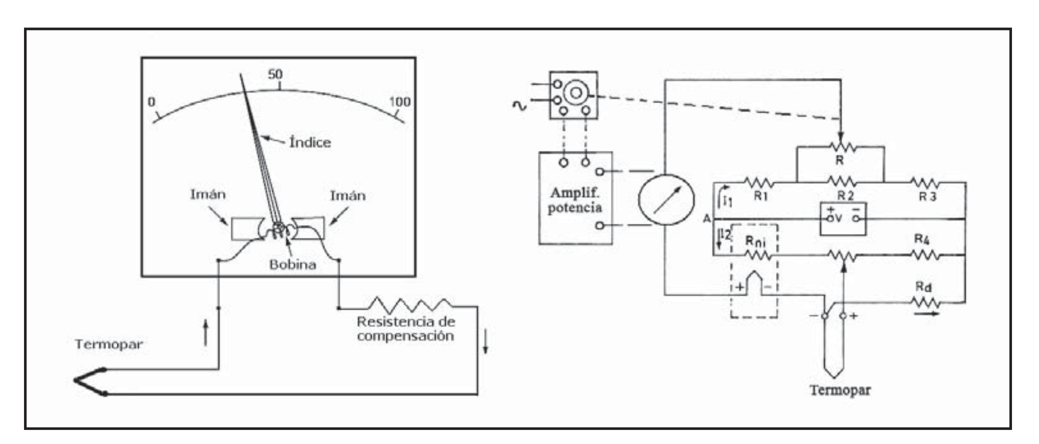


Figura 6.24 Circuitos galvanométrico y potenciométrico

El *circuito potenciométrico* está representado en la figura 6.24 y consta de una fuente de tensión constante V que alimenta los dos brazos del circuito, con corrientes I_1 e I_2. El termopar T está conectado al brazo inferior E y, a través de un miliamperímetro, al reóstato R. La posición R del cursor del reóstato R indica la temperatura del proceso cuando no pasa corriente por el miliamperímetro, es decir, cuando el punto C del cursor de reóstato R y el punto E están a la misma tensión.

Al circuito se le incorpora un dispositivo de autoequilibrio que sustituye al miliamperímetro por un amplificador. Mientras exista una diferencia de potencial, entre la f.e.m. desarrollada por el termopar y la tensión dada por el cursor del reóstato R, el circuito amplificador excitará el motor de equilibrio hasta que la posición del cursor sea la correcta para la temperatura del proceso captada por el termopar. Así, pues, la posición del cursor representa mecánicamente la f.e.m. generada por el termopar y, por lo tanto, su temperatura. La resistencia R_{ni} compensa las variaciones de temperatura en la unión de referencia del termopar. Absorbe una tensión equivalente a la f.e.m. que tendría el termopar con la unión caliente a la temperatura de la caja del instrumento y la unión fría a 0 °C.

El circuito también tiene una resistencia R_d de protección contra rotura del termopar o del cable de compensación. Esta resistencia es de valor elevado, y la intensidad que circula a su través origina una caída de tensión que se suma a la generada por el termopar, produciendo un corrimiento de cero. Esta caída de tensión es despreciable y no influye en condiciones normales de trabajo. Sin embargo, ante la rotura del termopar, la resistencia R_d cierra el circuito del amplificador lo suficiente para que el cursor del reóstato se desplace hasta el tope de la escala y pueda accionar una alarma.

A señalar que la adición de un microprocesador permite obtener, por hardware o software, circuitos potenciométricos de diferentes características (figura 6.25), así como transmisores "inteligentes" preparados para la medida automática de la temperatura con diferentes tipos de termopares o señales en milivoltios, con compensación de temperatura de la unión fría, con rutinas de autodiagnóstico, con linealización de la señal de salida de 4-20 mA c.c., y con aislamiento galvánico entre la entrada y la salida (lo que permite la conexión a tierra del sensor con una protección elevada contra ruidos). El microprocesador del circuito potenciométrico tiene en memoria las tablas de f.e.m./temperatura o bien las funciones polinómicas correspondientes.

En la medida de temperaturas con termopares pueden presentarse dos casos: la comprobación del instrumento (galvanométrico, potenciométrico o digital) y la verificación de la f.e.m. del termopar.

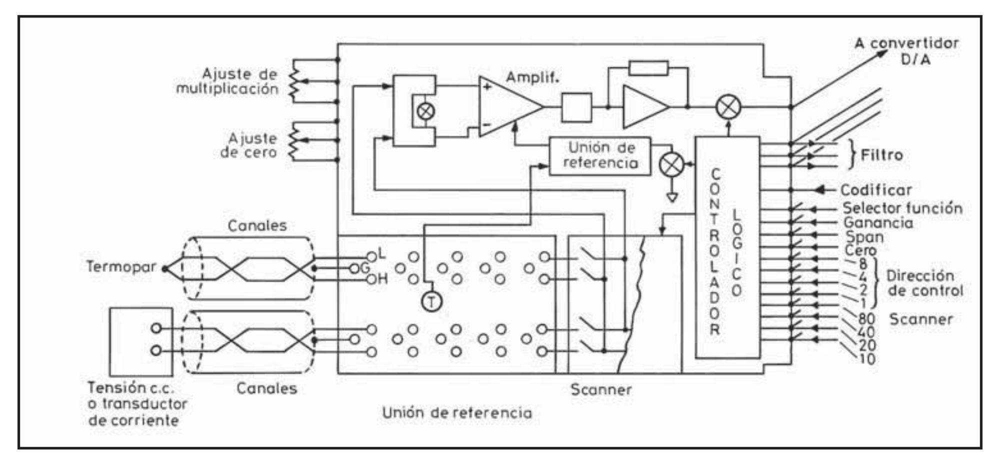


Figura 6.25 Circuito digital de medida de temperatura

6.8.4 Verificación de un instrumento y de un termopar

La comprobación del instrumento con compensación de la temperatura ambiente se efectúa de la forma siguiente:

Se utilizan las tablas de conversión de f.e.m. referidas a 0 °C de la unión fría para determinar la f.e.m. en mV correspondiente a la temperatura del proceso (t) y la f.e.m. debida a la temperatura ambiente (la medida con un termómetro de mercurio colocado al lado del instrumento). Se restan estas f.e.m., ya que en condiciones normales de trabajo el instrumento recibirá la fuerza electromotriz (V - Va) y marcará la temperatura (t) correspondiente a la f.e.m., puesto que tiene compensación de temperatura ambiente. Por lo tanto, generando con el potenciómetro (generador de mV) dicha f.e.m., el instrumento deberá marcar la temperatura (t). En caso contrario, el instrumento estará descalibrado.

Un ejemplo aclarará la explicación anterior.

Sea un instrumento de escala 0-700 °C tipo J, con compensación de temperatura ambiente. Se trata de comprobarlo para la temperatura de 700 °C. Se conecta el potenciómetro generador de mV al aparato y con un termómetro de mercurio adosado se lee 20 °C. Consultadas las tablas de conversión del termopar tipo J se encuentran los siguientes valores:

F.e.m. correspondiente a 700 °C = 39,1 mV.

F.e.m. correspondiente a 20 °C = 1,019 mV.

Diferencia = 38,111 mV.

Así pues, generando con el potenciómetro una f.e.m. de 38,111 mV, el índice (o el valor digital) indicador de la temperatura deberá situarse en 700 °C, si está bien calibrado.

En los potenciómetros con microprocesador, la operación es más sencilla, ya que el aparato tiene compensación de temperatura de la unión fría y dispone, en memoria, de los valores f.e.m./temperatura para los diferentes tipos de termopares industriales o bien de las funciones polinómicas de los valores de la f.e.m. en función de la temperatura, por lo que bastaría situar, directamente, bien 700 °C, bien 38,111 mV.

Los termopares están expuestos a condiciones del proceso que pueden provocar una degradación de los materiales metálicos que los forman, por lo que el termopar puede dejar de cumplir con las tablas de f.e.m. que le correspondan y precisar su sustitución.

La verificación de la f.e.m. de un termopar se efectúa de la siguiente forma. En este caso, el potenciómetro generador de milivoltios está conectado a los bornes del termopar y se dispone de un instrumento patrón (conectado a un termopar patrón) que mide la temperatura real (t) del proceso. Un termómetro de mercurio, colocado al lado del potenciómetro, dará la temperatura ambiente (ta). Utilizando las tablas de conversión se sumarán la f.e.m. Vp leída en el potenciómetro y la Va correspondiente a la temperatura ta, ya que dentro del potenciómetro se encuentra la junta fría y la f.e.m. leída es menor en un valor Va (correspondiente a ta) a la V que se obtendría si la unión fría estuviera a 0 °C.

Un ejemplo aclarará la explicación.

Sea un termopar tipo J de hierro-constantán a verificar. Conectado el potenciómetro se lee una f.e.m. de 38,111 mV. El termómetro de mercurio situado sobre la caja da una temperatura ambiente de 20 °C. Consultadas las tablas de conversión se encuentra una f.e.m. de 1,019 mV para el termopar tipo J a 20 °C.

La f.e.m. que generaría el termopar con la unión fría a 0 °C sería:

38,111 + 1,019 = 39,130 mV

que en la tabla de conversión corresponde a 700 °C.

Esta es, pues, la temperatura que otro termopar patrón conectado a otro instrumento patrón debería señalar. De no ser así, el termopar sería defectuoso o estaría envejecido.

Hay que señalar que los razonamientos expuestos en los dos casos están basados en la ley de las temperaturas sucesivas, expuesta al inicio del estudio de los termopares.

Si el potenciómetro fuera digital con compensación de temperatura, directamente leería 700 °C, con lo que la verificación es mucho más cómoda.

6.8.5 Normas técnicas

DIN-IEC-584-1: *Tablas de referencia internacional de temperatura.*

DIN-IEC-584-2: *Tolerancias de termopares.*

BS-4937: *Tolerancias de termopares.*

BS-1041-PARTE 5-1989: *Guía de selección y uso de pirómetros de radiación.*

UNE-EN-60751: *Sondas industriales de resistencia termométrica de platino.*

ASTM E-220-1986: *Calibración de termopares por técnica de comparación.*

ASTM E-230-1987: *Tablas de fem-temperatura para termopares.*

ASTM E-1137-1987: *Especificaciones estándar para resistencias termométricas de platino.*

ASTM E-644-1986: *Resistencias termométricas industriales.*

DIN-43710-1985: *Termopares tipo U y tipo L.*

6.9 Pirómetros de radiación

Los *pirómetros de radiación* se fundan en la ley de Stefan-Boltzmann, que dice que la intensidad de energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Kelvin) del cuerpo, es decir:

$$W = K \times T^4$$

siendo:

W = intensidad de energía radiante

K = constante

T = temperatura absoluta del cuerpo

En la figura 6.26 se representa un gráfico de energía radiante de un cuerpo negro a varias temperaturas, en función de la longitud de onda (Ley de Planck de emisión térmica de la energía radiante). Desde el punto de vista de medición de temperaturas industriales, las longitudes de onda térmicas abarcan desde 0,1 micras, para las radiaciones ultravioletas, hasta 12 micras, para las radiaciones infrarrojas. Puede observarse que la radiación visible ocupa un intervalo entre la longitud de onda de 0,45 micras, para el valor violeta, hasta 0,7 micras, para el rojo.

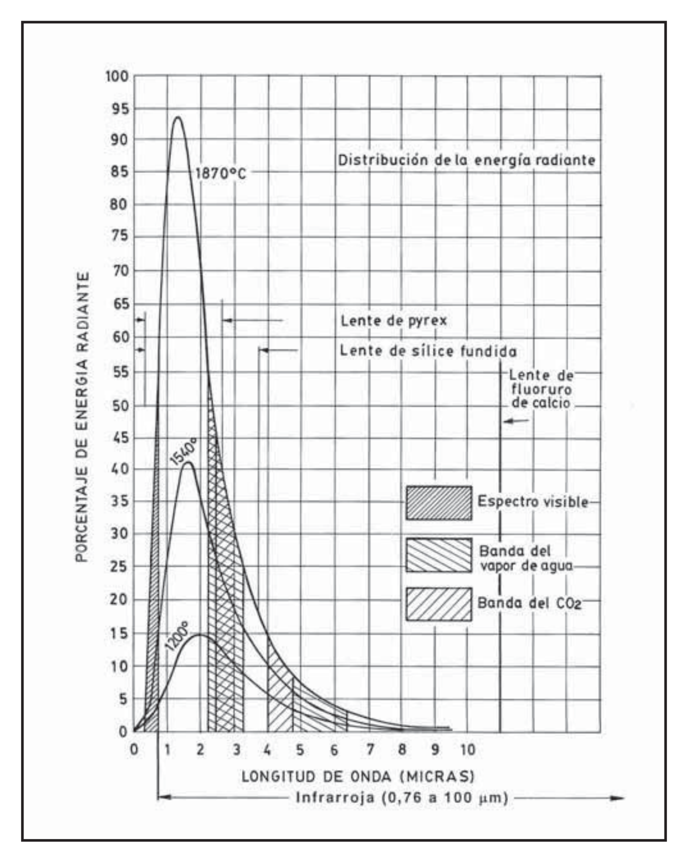


Figura 6.26 Gráfico de la energía radiante de un cuerpo

El *coeficiente de emisión* o *emisividad* de un cuerpo es la relación entre la energía radiante emitida por un cuerpo y la de un cuerpo negro que se encuentra a la misma temperatura y en las mismas condiciones de servicio.

Un cuerpo negro es aquel que absorbe totalmente las radiaciones que recibe y es también un perfecto emisor. Su emisividad es la unidad. Los cuerpos cuyo coeficiente de emisión es menor que la unidad se conocen como cuerpos opacos.

La energía que radia el cuerpo negro es función de su temperatura absoluta. Por ejemplo, la energía radiante que emerge de una pequeña abertura en la pared de un recinto calentado uniformemente y con paredes opacas (que tenga o no objetos en su interior a la misma temperatura) tiende a ser radiación de cuerpo negro, ya que la energía que entra o sale de la abertura no se refleja sino que es absorbida a través de las innumerables reflexiones internas. Este es el caso de muchas instalaciones industriales en las que el pirómetro enfoca directamente a una abertura del horno o al extremo de un tubo de mira cerrado. Un pirómetro de radiación calibrado para condiciones de cuerpo negro indicará una baja temperatura del cuerpo que enfoca si éste se encuentra en el exterior.

La *emisividad* depende mucho del estado de la superficie del cuerpo emisor; para un metal como el cobre pasa de 0,10 a 0,85 si el metal, perfectamente pulido, se recubre bruscamente con una capa de óxido. Igual sucede con un baño metálico líquido.

El pirómetro dirigido sobre una superficie incandescente no nos dará su verdadera temperatura si la superficie no es perfectamente negra, es decir, que absorba absolutamente todas las radiaciones y no refleje ninguna. En los casos generales, es preciso hacer una corrección de la temperatura leída (temperatura de brillo S) para tener en cuenta el valor de absorción o emisión ε de la superficie.

Señalemos ahora algunos aspectos de la aplicación de los pirómetros de radiación en la medición de temperaturas de cuerpos negros, opacos y transparentes.

Un cuerpo opaco emite, a una temperatura dada, una cantidad de energía de radiación que depende del material y de la forma de la superficie. El cuerpo puede reflejar energía radiante adicional, procedente de cuerpos próximos, llamas, etc., de modo que si tiene un bajo coeficiente de emisión reflejará una gran cantidad de energía incidente y, al contrario, con un alto coeficiente de emisión la energía reflejada será baja.

Si la emisividad del cuerpo es conocida, el instrumento receptor lleva acoplado un dispositivo que permite ajustar directamente la lectura a la temperatura exacta del cuerpo caliente.

En la tabla 6.11 pueden verse los coeficientes de emisión de varias sustancias situadas en estas condiciones. Hay que señalar que los coeficientes de emisión de materiales tales como el óxido de cobre, óxido de hierro y óxido de níquel son lo suficientemente elevados para medir, de forma muy exacta, la temperatura sin demasiados errores procedentes de radiaciones parásitas.

En la figura 6.27 puede verse la variación de la emisividad de varias sustancias según el estado de la superficie de las muestras y la temperatura.

Dentro de la banda de ondas de operación, el pirómetro no puede distinguir entre la energía emitida por el cuerpo y la transmitida y reflejada por otras fuentes de radiación.

En un crisol conteniendo vidrio en fusión, la energía radiante emitida por el fondo a las paredes del crisol puede emerger a través del vidrio. Si el crisol es opaco, su energía radiante es la propia de un cuerpo negro y puede transmitirse, parcialmente, a través del vidrio hacia el exterior. Así pues, la energía radiante emitida estará compuesta de la del crisol y de la propia del vidrio.

Material	*Zona de valores observados*	*Valor probable para el óxido formado en la superficie de los metales*
Laton (oxidado)	—	0,60
Cobre recalentado	0,26	—
Cobre recalentado (oxidado)	—	0,19
Acero recalentado (oxidado)	—	0,57
Refractario	0,75	—
Esmalte dorado	0,37	—
Plomo (oxidado)	—	0,63
Monel (oxidado)	—	0,43
Níquel (oxidado)	—	0,85
Aluminio oxidado	0,22 a 0,40	0,30
Berilio oxidado	0,07 a 0,37	0,35
Óxido de cerio	0,58 a 0,80	—
Óxido de cromo	0,60 a 0,80	0,70
Óxido de cobalto	—	0,75
Óxido de culombio	0,55 a 0,71	0,70
Óxido de cobre	0,60 a 0,80	0,70
Óxido de hierro	0,63 a 0,98	0,70
Óxido de magnesio	0,10 a 0,43	0,20
Óxido de níquel	0,85 a 0,96	0,90
Óxido de torio	0,20 a 0,57	0,50
Óxido de estaño	0,32 a 0,60	—
Óxido de titanio	—	0,50
Óxido de uranio	—	0,30
Óxido de vanadio	—	0,70
Óxido de itrio	—	0,60
Óxido de zirconio	0,18 a 0,43	0,40
Alumel (oxidado)	—	0,87
Fundición de hierro (oxidado)	—	0,70
Cromel P(90 Ni - 10 Cr) (oxidado)	—	0,87
80 Ni - 20 Cr (oxidado)	—	0,90
60 Ni - 24 Fe - 16 Cr (oxidado)	—	0,83
55 Fe - 37,5 Cr - 7,5 Al (oxidado)	—	0,78
70 Fe - 23 Cr - 5 Al - 2 Co (oxidado)	—	0,75
Constantán (55 Cu-45 Ni) (oxidado)	—	0,84
Acero al carbono (oxidado)	—	0,80
Acero inoxidable (18-8) (oxidado)	—	0,85
Porcelana	0,25 a 0,50	—

Tabla 6.11 Coeficientes de emisión total de sustancias diversas

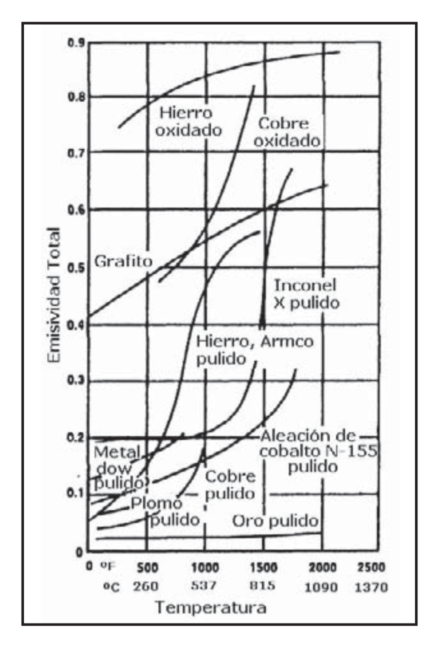


Figura 6.27 Variación de la emisividad de varios metales

Los pirómetros de radiación miden, pues, la temperatura de un cuerpo a distancia en función de su radiación. Existen varios tipos, el pirómetro óptico que capta la radiación luminosa entre 0,4 a 0,7

micras, el pirómetro de infrarrojos de 0,7 a 20 micras, el detector fotoeléctrico que mide la radiación térmica, el pirómetro de dos colores o de relación entre radiaciones correspondientes a dos bandas estrechas y el pirómetro de radiación total, que mide toda la radiación emitida por el cuerpo.

6.9.1 Pirómetros ópticos de desaparición de filamento

Los pirómetros ópticos manuales aparecieron en el mercado en el año 1900 y se basan en la desaparición del filamento de una lámpara al compararlo visualmente con la imagen del objeto enfocado. El operador varía la corriente de la lámpara hasta que el filamento de la misma deje de verse sobre el fondo del objeto caliente enfocado.

El sistema óptico del pirómetro restringe el ancho de onda de 0,65 a 0,66 micras (zona roja del espectro) y dispone de filtros para reducir la intensidad de la radiación recibida, permitiendo la medida de un amplio margen de temperaturas. Sin embargo, sólo puede medirse la temperatura de objetos incandescentes o en fusión.

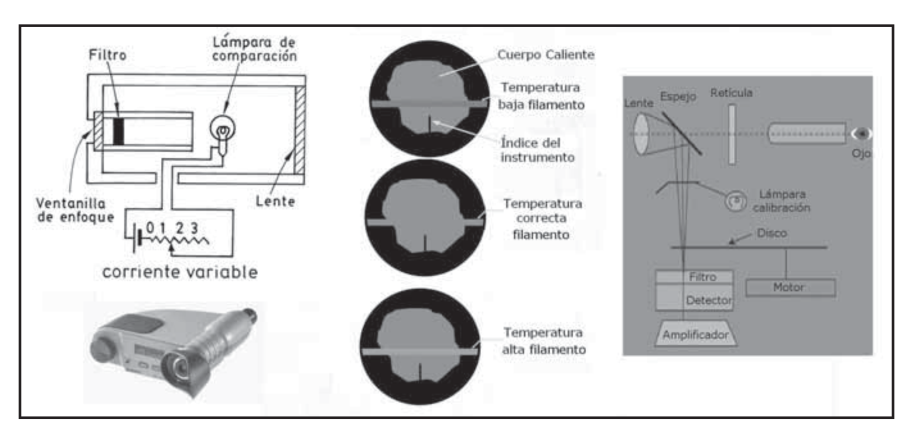


Figura 6.28 Pirómetros ópticos de desaparición de filamento

Los pirómetros ópticos automáticos son parecidos a los de la radiación infrarroja. Comparan la radiación emitida por el cuerpo con la emitida por una fuente de referencia controlada. Consisten, esencialmente, en un disco rotativo que expone el detector a la radiación del objeto y a la de referencia, alternativamente. La exactitud de los pirómetros ópticos es del ± 1% al ± 2%.

6.9.2 Pirómetro de infrarrojos

El *pirómetro de infrarrojos* capta la radiación espectral del infrarrojo, invisible al ojo humano, y puede medir temperaturas menores de 700 °C, supliendo al pirómetro óptico que sólo puede trabajar, eficazmente, a temperaturas superiores a 700 °C, donde la radiación visible emitida es significativa. Las temperaturas medidas abarcan desde valores inferiores a 0 °C hasta 4.000 °C.

En la figura 6.29 puede verse un esquema del pirómetro de infrarrojos. La lente filtra la radiación infrarroja emitida por el área del objeto examinado y la concentra en un sensor de temperatura fotoresistivo que la convierte en una señal de corriente y, a través de un algoritmo interno del instrumento y de la emisividad del cuerpo enfocado, la pasa a un valor de temperatura. La señal de salida puede ser analógica (4-20 mA c.c.) o digital. La relación de la distancia del objeto al sensor, y del tamaño de la imagen sobre la lente, varía entre 2:1 hasta 300:1.

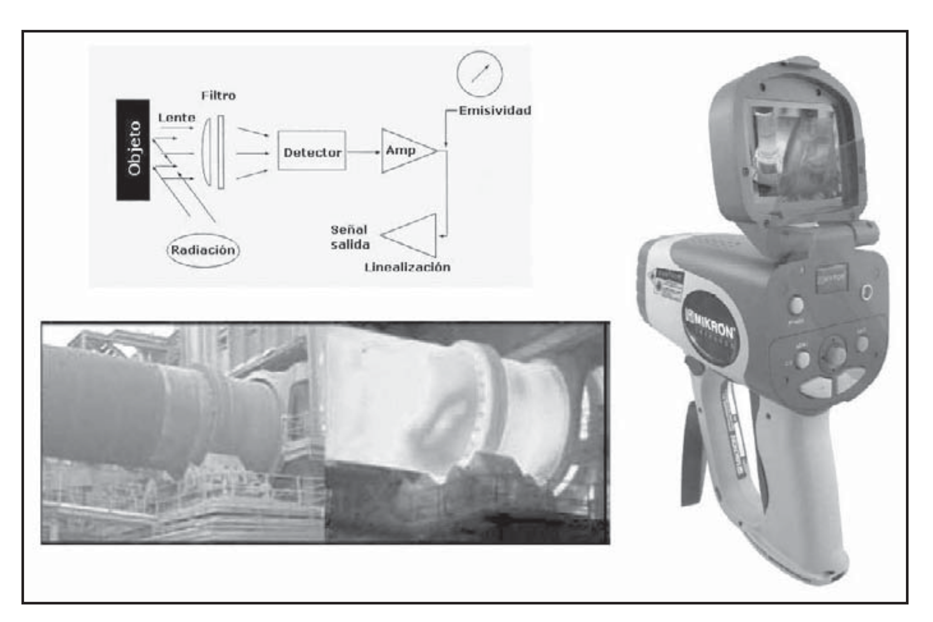


Figura 6.29 Pirómetro de infrarrojos

Análogamente al pirómetro óptico, debe considerarse el coeficiente de emisión del cuerpo. El aparato dispone de un compensador de emisividad que permite corregir la temperatura leída, no solo para la pérdida de radiación en cuerpos con emisividad menor que uno, sino también cuando hay vapores, gases, humos o materiales transparentes que se interponen en el camino de la radiación. A señalar que la emisividad del cuerpo es dinámica y puede tener valores diferentes a distintas longitudes de onda. Este inconveniente lo solucionan los termómetros de infrarrojos de banda de onda estrecha, ya que el valor de la emisividad no varía sustancialmente dentro de la banda. Algunas aplicaciones, en ambientes extremadamente calurosos, pueden requerir una camisa enfriada por agua en el detector. Su respuesta es más rápida que la de los termopares, alcanzando el 95% del valor final en 1 milisegundo, por lo que se prestan a la medición de temperaturas de objetos móviles o de objetos que se calienten rápidamente. La exactitud es del ± 0,3%.

Existen cámaras infrarrojas termográficas que permiten almacenar imágenes termográficas con su distribución de temperaturas y procesarlas en un ordenador, lo que es de interés, en la industria, en mantenimiento preventivo y predictivo. El campo de medida es de 0 °C hasta 350 °C, alcanzando los 1200 °C con una exactitud del ± 2%.

6.9.3 Pirómetro fotoeléctrico

Los d*etectores fotoeléctricos o cuánticos (quantum)* consisten en materiales semiconductores cristalinos, tales como el indio antimonio (InSb), el silicio (Si), el sulfuro de plomo (PbS) y el sulfuro de cadmio (CdS), que responden a los fotones de radiación del cuerpo que se enfoca liberando cargas eléctricas a través de mecanismos de fotoelectricidad, fotoconducción o fotovoltaico. Responden a diferentes partes del espectro, de modo que muestran una gran selectividad en las ondas en que operan y su detectividad espectral es 1 millón de veces mayor que la de los detectores térmicos (figura 6.30). Estos semiconductores poseen una excelente relación señal ruido, de modo que operando en longitudes de onda corta, y bandas estrechas, permiten medidas precisas de bajas temperaturas.

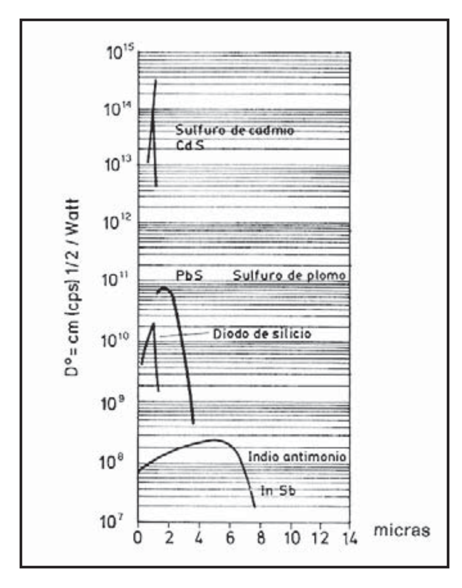


Figura 6.30 *Energía relativa según la longitud de onda de cuatro detectores fotoeléctricos*

La señal de salida depende de la temperatura instantánea del volumen del detector, por lo que evita los retardos, inherentes al aumento de la temperatura de la masa del detector, que existen en los otros modelos de pirómetros térmicos. La tensión eléctrica generada por el detector es:

$$V = K \times T^3$$

siendo:

V = fuerza electromotriz

K = constante

T = temperatura absoluta del cuerpo

Una estimación no suficientemente aproximada de la emisividad del cuerpo puede conducir a errores, que pueden hacerse mínimos si se selecciona un instrumento de corta longitud de onda y de pequeño ancho de banda. Por ejemplo, un error en la emisividad del 10% representa un error en la indicación del instrumento de ± 25 °C a 1750 °C y de ± 75 °C a 3000 °C, mientras que un 25% de error en la emisividad conduce a un error de ± 75 °C a 1750 °C y de ± 190 °C a 3000 °C.

Uno de los métodos clásicos para amplificar la señal es interrumpir la misma mediante un disco ranurado a varios cientos de Hertz, con lo que se obtiene una señal de corriente alterna que puede ser amplificada (figura 6.31).

En aplicaciones de la industria del vidrio, tales como la medición de la temperatura de las gotas de vidrio en su caída, el instrumento trabaja con longitudes de onda de 4,8 a 5,6 micras, que dan una mínima interferencia con el vapor de agua, dióxido de carbono y la luz solar, en el intervalo de 35 °C a 540 °C con una constante de tiempo de 0,2 a 0,5 segundos.

El instrumento con detector fotoeléctrico de uso general tiene un campo de trabajo de 15 °C a 3000 °C, pudiendo enfocar desde 1 m hasta el infinito, posee una constante de tiempo de 2,20 o 200 ms y puede llegar a tiempos de respuesta de nanosegundos, lo que es indudablemente una ventaja en la

medida de cambios rápidos de temperatura, o de movimientos rápidos del proceso, cuando el ruido eléctrico, que acompaña a la medida, está dentro de límites aceptables.

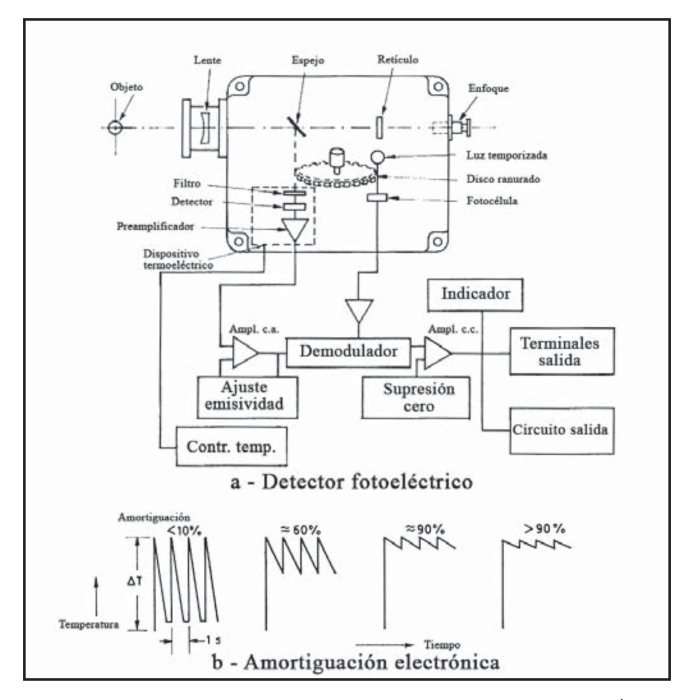


Figura 6.31 *Esquema de funcionamiento de un detector fotoeléctrico*

6.9.4 Pirómetro de dos colores

El *pirómetro de relación*, o de *dos colores*, se basa en que la relación entre las radiaciones emitidas, en dos bandas estrechas del espectro, es función de la temperatura y de la relación entre emisividades del cuerpo correspondientes a las dos bandas. El instrumento dispone de un selector de relación de emisividades y, de este modo, si la relación seleccionada es la correcta, el aparato puede indicar la temperatura real del objeto con una gran exactitud. Su empleo es excelente en los llamados cuerpos grises, es decir, aquellos cuyo coeficiente de emisión es constante para todas las longitudes de onda. Por otro lado, este pirómetro permite medir a través de atmósfera de humos, vapor y polvo ya que, por su principio de funcionamiento, la lectura es teóricamente independiente de la absorción de la atmósfera intermedia.

En la figura 6.32 puede verse un gráfico de cuatro operaciones de fundición de un metal líquido controladas con un pirómetro óptico convencional y con un pirómetro de dos colores o de relación, y otros dos gráficos de una fundición de metal donde se comparan los dos tipos de pirómetros y donde aparecen la temperatura y la emisividad en función del tiempo.

Un pirómetro de dos colores divide básicamente la radiación del objeto en dos haces medidos por dos células fotoeléctricas de silicio similares, una de ellas dispone de un filtro que sólo deja pasar la radiación de longitud de onda más corta (0,65 micras) y la otra en la zona de 0,9 micras. La relación entre las dos corrientes de salida de la célula es una medida de la temperatura del objeto.

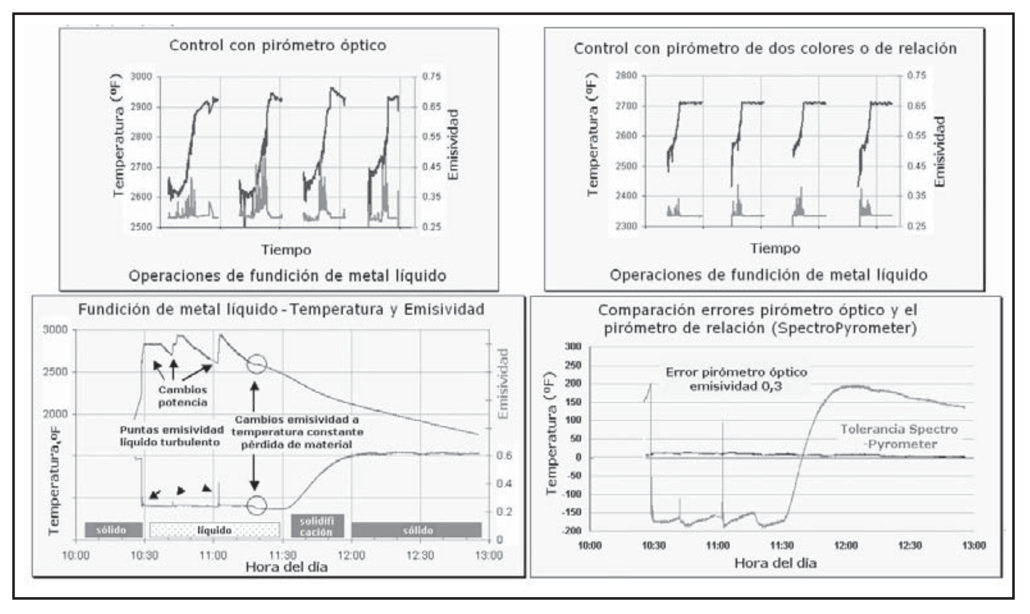


Figura 6.32 Fundición de un metal con temperaturas controladas con un pirómetro óptico y un pirómetro de dos colores. Fuente: SpectroPyrometer de la asociación FAR

El pirómetro es susceptible al ruido eléctrico, ya que las diferencias en intensidad en las dos bandas son relativamente pequeñas y, además, como las emisividades relativas son menos conocidas que el valor absoluto de la emisividad, los errores pueden ser muy grandes si un color es más afectado que el otro por el entorno o por cambios en el material (entorno ambiental, estado de la superficie, formación de óxido, etc.). La técnica del láser aplicada en pirometría resuelve estos problemas, de tal modo que, en una superficie con emisividad desconocida, un rayo láser que se refleje en la superficie proporciona un valor de la emisividad próximo a la unidad.

6.9.5 Pirómetro de radiación total

El *pirómetro de radiación total* (figura 6.33) capta una banda amplia de radiación y está formado por una lente de pírex, sílice o fluoruro de calcio que concentra la radiación del objeto caliente en una termopila formada por varios termopares de Pt-Pt/Rh, de pequeñas dimensiones y montados en serie. La radiación está enfocada, incidiendo directamente en las uniones calientes de los termopares. Su reducida masa les hace muy sensibles a pequeñas variaciones de la energía radiante y, además, muy resistentes a vibraciones o choques. La parte de los termopares expuesta a la radiación está ennegrecida, para comportarse como un cuerpo negro, aumentando así sus propiedades de absorción de energía y proporcionando la máxima f.e.m.

La f.e.m. que proporciona la termopila depende de la diferencia de temperaturas entre la unión caliente (radiación procedente del objeto enfocado) y la unión fría, y es compensada mediante una resistencia de níquel conectada en paralelo con los bornes de conexión del pirómetro y colocada en su interior, de modo que su temperatura es siempre igual a la del cuerpo de éste. Al aumentar la temperatura ambiente aumenta el valor de la resistencia de la bobina de níquel, lo que compensa la pérdida de f.e.m. de la termopila que acompaña el calentamiento del cuerpo del instrumento.

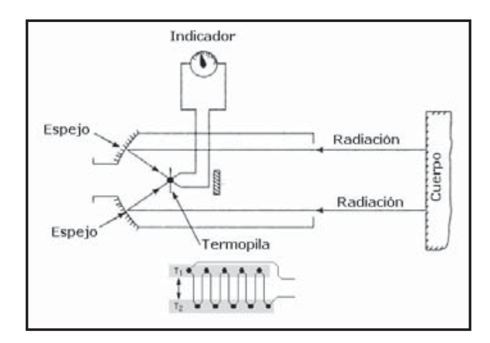
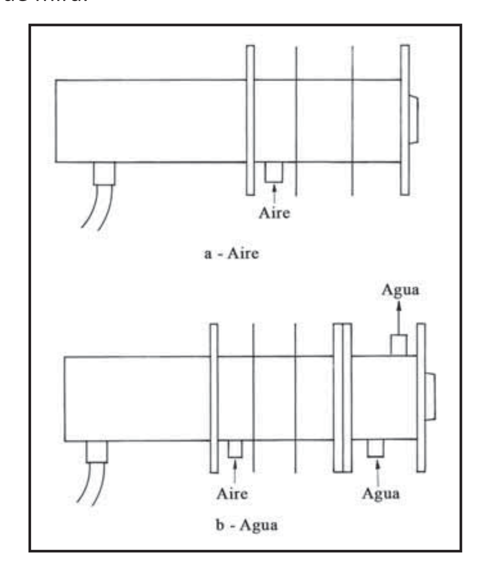


Figura 6.33 Pirómetro de radiación total

La compensación descrita se utiliza para temperaturas ambientes máximas de 120 °C. A mayores temperaturas, se emplean dispositivos de refrigeración por aire o por agua, que disminuyen la temperatura de la caja en unos 10 °C a 40 °C por debajo de la temperatura ambiente.

El pirómetro puede disponer de los siguientes accesorios:

- Lente posterior para enfocar correctamente la radiación en la termopila.
- Dispositivo automático de seguridad para aislar la lente del proceso y proteger el pirómetro en el caso de que una llama lo alcance directamente.
- Dispositivo de refrigeración por aire que protege la lente contra un calentamiento excesivo y, al mismo tiempo, la mantiene limpia de los gases o vapores que pueden estar en contacto con el tubo de mira.



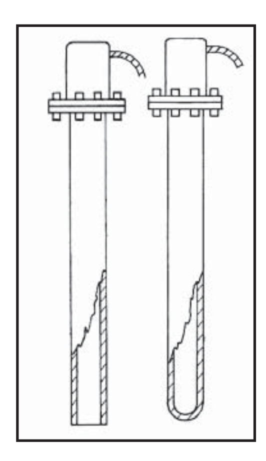


Figura 6.34 Dispositivos de refrigeración y tubos de protección

- Dispositivo de refrigeración por agua empleado usualmente con el dispositivo de refrigeración por aire.
- Tubos de mira con extremo abierto utilizados para proteger la lente.

- Tubos de mira con extremo cerrado que se emplean en hornos con atmósfera a presión o con gases particularmente agresivos, y en las medidas de temperatura de metales fundidos en los que el tubo de mira debe estar sumergido (por la existencia de escorias en la superficie del metal, que darían lugar a una temperatura leída errónea). El fondo del tubo es la fuente de radiación y las paredes laterales tienen poca influencia. Al ser el tubo cerrado, las condiciones de trabajo se aproximan a las de cuerpo negro.

Los tubos de protección de los pirómetros de radiación pueden ser metálicos o cerámicos. Los primeros son de acero inoxidable o aleaciones metálicas resistentes al calor y a la corrosión, y se emplean a temperaturas que no superan generalmente los 1100 °C. Permiten una respuesta más rápida a los cambios de temperatura que los tubos cerámicos.

Los tubos cerámicos más utilizados están formados esencialmente de los materiales:

- Carburo de silicio, que se utiliza principalmente en los hornos por ofrecer buenas características térmicas, respuesta rápida a las variaciones de temperatura y resistencia a los cambios bruscos de temperatura.
- Sillramic, material refractario vitrificado que a temperaturas elevadas presenta gran resistencia al choque térmico y a la penetración de los gases presentes en el horno, pero posee baja resistencia mecánica. Por sus motivos, este tubo debe ser usado con gran precaución. En los tratamientos térmicos en baños de sales conviene, en la puesta en marcha, calentar lentamente y sumergir a poca velocidad (se recomienda unos 25 mm por minuto), para evitar un brusco choque térmico que daría lugar a su rotura. Al cabo de unas pocas inmersiones es necesario sustituirlo, si bien, el coste es menor que si se empleara para la medida un termopar de Pt-Pt/Rh.

La relación entre la fuerza electromotriz generada y la temperatura del cuerpo es independiente de la distancia entre el cuerpo y la lente (excluyendo la presencia de gases o vapores que absorban energía) siempre que la imagen de la superficie del cuerpo emisor de la radiación cubra totalmente la unión caliente de la termopila.

El fabricante normaliza la relación entre las dimensiones del objeto y su distancia a la lente para garantizar unas buenas condiciones de lectura. De este modo, existen pirómetros de radiación de ángulo estrecho (factor de distancia 20:1) y de ángulo ancho (factor de distancia 7:1) (figura 6.35).

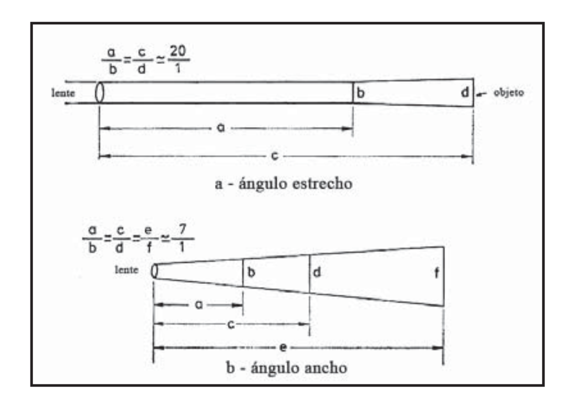


Figura 6.35 Pirómetros de radiación de ángulos estrecho y ancho

Un problema de gran importancia es la selección del material de la lente que debe transmitir la máxima energía compatible con la gama de radiación emitida.

Las lentes de pírex se utilizan en el campo de temperaturas de 850 °C a 1.750 °C, la lente de sílice fundida en el intervalo de 450 °C a 1.250 °C y la lente de fluoruro de calcio para temperaturas inferiores.

En la figura 6.36 pueden verse algunas aplicaciones industriales de los pirómetros de radiación.

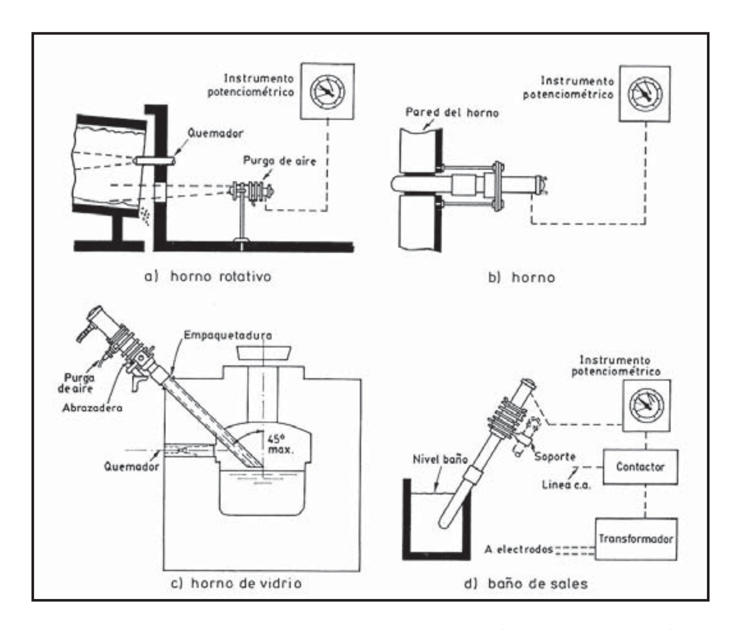


Figura 6.36 *Aplicaciones industriales de los pirómetros de radiación*

Las dificultades expuestas, y los problemas que se presentan para determinar la temperatura verdadera de un cuerpo mediante pirómetros de radiación total, pueden hacer creer al lector que la regulación de temperaturas con estos instrumentos es muy difícil. Sin embargo, hay que señalar, afortunadamente, que en muchos procesos las condiciones de trabajo son repetitivas; de este modo, aunque se desconozcan la emisividad o se presenten radiaciones parásitas o el cuerpo sea transparente, se controlará el proceso en condiciones idénticas, es decir, a iguales indicaciones del instrumento, ya que en estos casos es más importante este punto que la detección de la temperatura real del proceso.

6.9.6 Otros fenómenos

Otros métodos de medida de temperatura utilizan instrumentos y diversas técnicas.

Los lápices, bolas de productos, lacas y cintas (figura 6.37) se usan como una forma aproximada de conocer la temperatura de la superficie de los cuerpos. Típicamente, los lápices dejan una marca, las bolas funden y las lacas licúan bruscamente al alcanzar la temperatura marcada. Las cintas contienen un indicador sensible al calor que se vuelve de color negro al llegar a la temperatura con una exactitud del ± 1%.

Un sensor de temperatura utilizado para medir temperaturas en máquinas rotativas está basado en la tecnología radar. El sensor, en contacto con el proceso, está separado entre 1 a 50 mm de la antena de radar que está contenida en la unidad de señal de proceso. Ésta emite un pulso de radar de baja energía y alta frecuencia que impacta al sensor, quien refleja el pulso. La forma y características de

este impulso reflejado dependen, únicamente, del volumen del sensor, es decir, de su temperatura. La amplitud de la medida es del orden de 0 °C a 200 °C y la precisión de ± 2 °C.

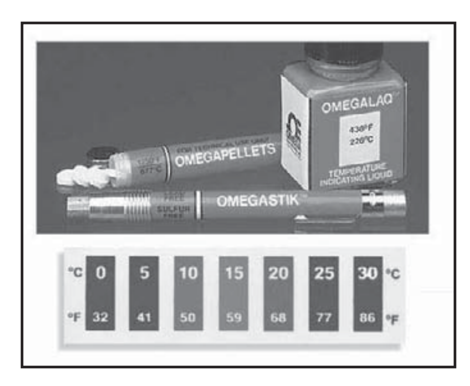


Figura 6.37 *Lápices y cintas de alta y media temperatura*

El sensor de temperaturas de fibra óptica consiste en una fibra óptica que conduce la radiación captada del objeto mediante un cristal de óxido de aluminio que actúa como un cuerpo negro. La fibra óptica tiene una lente en su extremo que enfoca la radiación sobre un detector (diodo fotoeléctrico de silicio) que, mediante un amplificador, genera una corriente proporcional a la intensidad de la radiación. Tiene una gran variedad de aplicaciones: calentamiento por inducción, fundición, forjado y estampación de metales, paletas de turbinas de gas y en transformadores de potencia. La precisión es del orden de 5 K dentro del intervalo de 1000 K a 1600 K.

El termómetro ultrasónico se basa en que la velocidad del sonido es proporcional a la temperatura del aire y experimenta un cambio drástico en las proximidades de un cuerpo caliente. De este modo, el tiempo empleado por un impulso ultrasónico disminuye cuando el impulso llega al objeto y regresa a la fuente de ultrasonidos. El sistema puede medir temperaturas del aire dentro del intervalo de 0 °C a 80 °C con una exactitud de ± 0,4 °C.

El termómetro de cristal de cuarzo mide la frecuencia de un oscilador de cuarzo, en contacto con el cuerpo cuya temperatura desea medirse, mediante un contador que utiliza como reloj de referencia la señal de un oscilador a temperatura controlada. Su margen de trabajo es de -80 °C a +250 °C y su exactitud es muy elevada, de ± 0,075 °C.

Algunas sales paramagnéticas, tales como el sulfato amónico férrico, tienen la propiedad de cambiar de estado de energía bajo la acción de un fuerte campo magnético. Manteniendo como única variable la susceptibilidad magnética de la sal es posible medir temperaturas muy bajas, inferiores a 1 K (procesos criogénicos).

Otros métodos de medición de temperaturas muy bajas incluyen la resonancia cuadripolar nuclear del 35CI (hasta 11 K), las uniones de efecto túnel (entre 0,3 K y 3 K), etc.

6.10 Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura

La constante de tiempo de un instrumento es el tiempo necesario para que alcance el 63,2% de la variación total de temperatura que experimenta. Es decir, si un instrumento cuya sonda o elemento

primario pasa de un recinto de 70 °C a otro de 270 °C puede alcanzar el 63,2% de la diferencia, 270 - 70 = 200 °C, en 0,1 segundo; este tiempo será la constante de tiempo de la medida con el instrumento (figura 6.38).

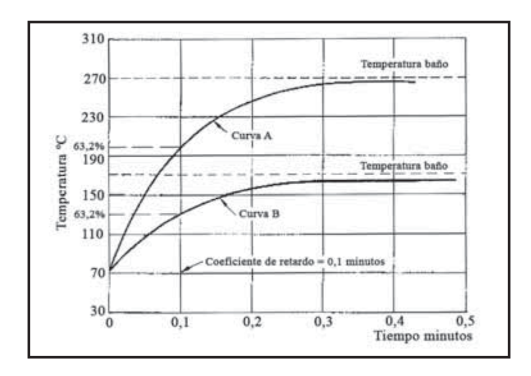


Figura 6.38 Velocidad de respuesta de un instrumento de temperatura

Los elementos primarios eléctricos, sondas de resistencia, termistores, termopares y pirómetros de radiación se caracterizan porque el tiempo de respuesta depende, únicamente, del intercambio térmico entre el fluido y el elemento, ya que la corriente eléctrica circula por los cables de conexión a la velocidad de la luz, directamente al receptor.

En la sonda de resistencia, la masa a calentar está formada por una bobina de hilo arrollada en un núcleo y embebida en una cápsula rígida. Véase la curva de respuesta en la figura 6.39.

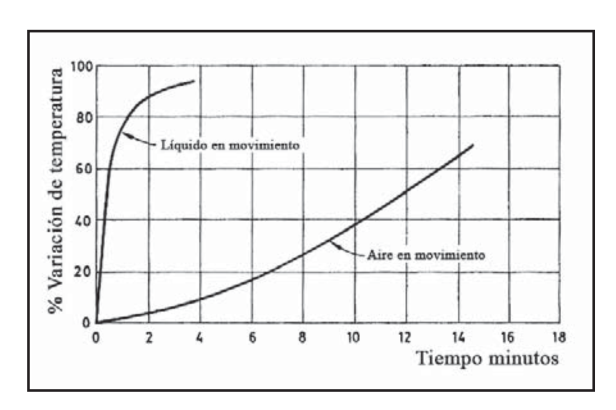


Figura 6.39 Respuesta de una sonda de resistencia

Los termistores son de pequeño tamaño y su tiempo de respuesta varía de fracciones de segundo a minutos, de acuerdo con su capacidad térmica, dada por el tamaño y forma del elemento sensible.

En el termopar, dos hilos soldados en un extremo constituyen la masa a calentar, que depende de la galga o diámetro de los hilos y de la forma de la soldadura, hilo torcido o soldado a tope (figura 6.40).

El pirómetro de radiación (figura 6.41) responde rápidamente a los cambios en la temperatura por dos razones principales: la captación de energía radiante es prácticamente instantánea y la masa de la termopila es muy pequeña.

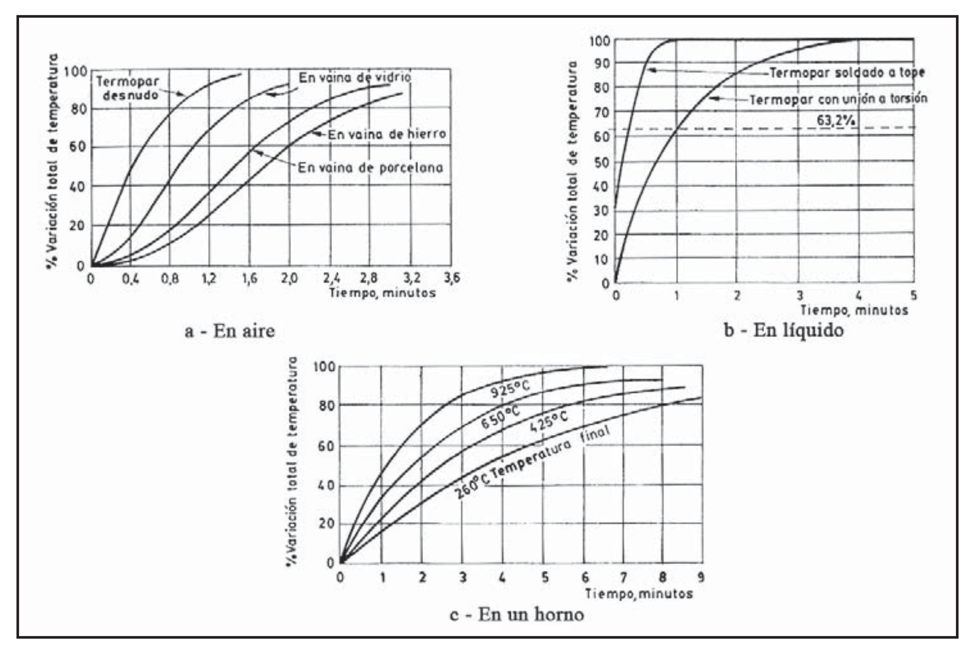


Figura 6.40 Respuesta de un termpoar

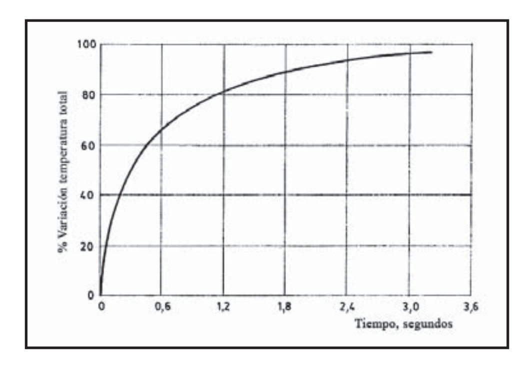


Figura 6.41 Respuesta de un pirómetro de radiación

Los elementos de temperatura están normalmente inmersos en vainas termométricas o en tubos de protección (figura 6.42), para tener así una protección mecánica o bien estar aislados del fluido cuya temperatura miden. La vaina se emplea para altas temperaturas y presiones y el espesor de sus paredes es mayor que el de los tubos de protección, por lo cual, lógicamente, su velocidad de respuesta será menor que el de éstos. Por otro lado, las vainas o tubos deben tener un diámetro interior en el cual se ajusten perfectamente los elementos; de este modo, se consigue que la transmisión térmica se realice, casi exclusivamente, por conducción a través de las paredes, sin que exista un volumen apreciable de aire que dé lugar a una transmisión intermedia por convección.

Hay que señalar que cuando las temperaturas de trabajo son relativamente bajas puede introducirse, en el extremo interior de la vaina o del tubo, una grasa especial que colabora eficazmente en la obtención de una respuesta muy rápida del sistema.

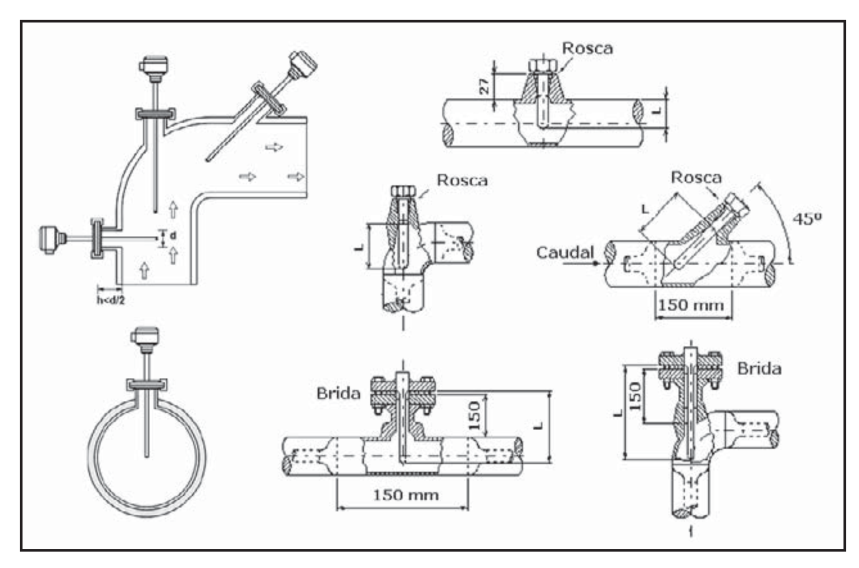
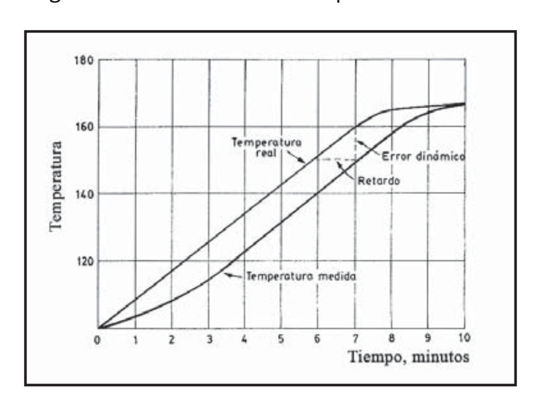


Figura 6.42 *Tipos de instalaciones de vainas en tuberías*

Siempre que sea posible, se recomienda prescindir de las vainas o tubos de protección para eliminar el retardo considerable que presentan a la transmisión de la temperatura.

Otros factores que influyen en la respuesta son la clase de fluido que rodea al elemento y la velocidad de circulación; cuanto mayor sea esta última tanto mayor será el suministro de calor del fluido al elemento de temperatura. En el aire, por ejemplo, el elemento tiene una constante de tiempo mayor que en un líquido, por lo cual se recomienda que la velocidad del aire sea como mínimo de 2 m/s para reducir así el coeficiente de retardo.

El error dinámico (figura 6.43a) es inherente a toda medida, ya que siempre se transfiere energía entre el fluido y el elemento y esta transferencia requiere, necesariamente, un cierto tiempo para efectuarse. Por ejemplo, un elemento con un cabezal no aislado de la atmósfera ambiente, conjuntamente con una escasa profundidad de inmersión (figura 6.43b), está sujeto a errores ya que el calor del fluido se pierde, en parte, a través de las paredes del recipiente o tubería sin transferirse totalmente al elemento. Si el intercambio de calor no es suficiente, la respuesta no es suficientemente rápida y existe el riesgo de un error dinámico importante.



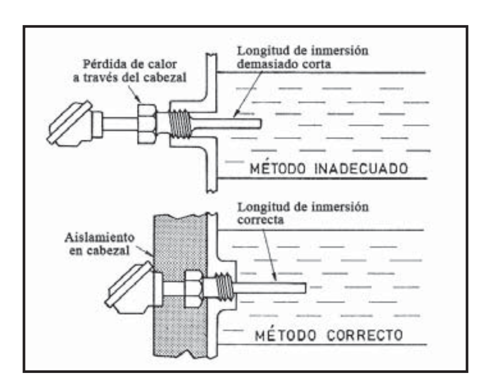


Figura 6.43 Error dinámico en la instalación de una vaina o tubo de protección

6.11 Tabla comparativa de características

En la tabla 6.12 puede verse un resumen de características de los instrumentos de temperatura

Sistema		Intervalo de temperaturas	Sensibilidad	Exactitud	Linealidad	Tiempo de respuesta	Deriva	Coste del sistema	Ventajas	Desventajas
Térmico	Vidrio	-35 ºC a 450 ºC	–	1 división	Excelente	1 a 10 seg	–	Bajo	Barato	Local
Térmico	Bimetal	0 ºC a 400 ºC	–	± 1%	Excelente	1 a 10 seg	–	Bajo	Barato	Local
Térmico	Bulbo y capilar									
Térmico	Líquido	-75 ºC a 300 ºC	–	± 1% o 1 división	Excelente	1 a 20 seg	–	Bajo	Barato	Local, bulbo y capilar frágiles, escape del fluido interno
Térmico	Vapor	-40 ºC a 300 ºC	–	± 1% o 1 división	Moderada	1 a 10 seg	–	Bajo	Barato	Local, bulbo y capilar frágiles, escape del fluido interno
Térmico	Gas	-80 ºC a 600 ºC	–	± 1% o 1 división	Excelente	1 a 4 seg	–	Bajo	Barato	Local, bulbo y capilar frágiles, escape del fluido interno
Térmico	Mercurio	-40 ºC a 650 ºC	–	± 1% o 1 división	Excelente	1 a 20 seg	–	Bajo	Barato	Local, bulbo y capilar frágiles, escape del fluido interno
Sonda de resistencia	Platino	-200 ºC a 500 ºC	0,0375 Ω/Ω/ºC	±0,5 ºC a ±3 ºC	Excelente	2 a 5 seg	±0,01% en 5 años	Moderado	Lineal, amplio margen de temperaturas	Baja sensibilidad, tiempo de respuesta lento, sensible a vibraciones, medida de 3 o 4 hilos, caro
Sonda de resistencia	Níquel	-100 ºC a 260 ºC	0,00618 Ω/Ω/ºC	±0,5 ºC a ±3 ºC	Excelente	2 a 5 seg	±0,01% en 5 años	Moderado		
Sonda de resistencia	Cobre	-100 ºC a 260 ºC	0,00427 Ω/Ω/ºC	±0,5 ºC a ±3 ºC	Excelente	2 a 5 seg	±0,01% en 5 años	Moderado		
Termistor		-40 ºC a 260 ºC	40 mV/ºC	±0,5ºC hasta 100ºC	Logarítmica, pobre	1 a 2 seg	±0,2 ºC a ±0,5 ºC por año	Bajo a moderado	Alta sensibilidad, respuesta rápida, pequeño tamaño, barato	Escala no lineal, temperatura limitada a -60 ºC a 300 ºC
Semiconductor IC		-55 ºC a 150ºC	1 mV/ºC o 1µA/ºC	±2ºC	Excelente	–	0,1 ºC/mes	Bajo	Alta sensibilidad lineal con relación a la temperatura, barato	Intervalo limitado de temperatura, fuente de alimentación requerida, Autocalentamiento, configuraciones limitadas

Tabla 6.12 Características de los medidores de temperatura

Termopar	E - Cromel/Constantan	-200 ºC a 900 ºC	68 µV/ºC	±1,5 ºC	Moderada	1 a 2 min.	1 a 2 ºC / año	Moderado	Amplio margen de temperaturas, barato, robusto	Escala no lineal, baja sensibilidad, baja tensión de salida afectada por RFI y EMI, compensación unión fría requerida
	T - Cobre/Constantan	-200 ºC a 260 ºC	10 µV/ºC	±0,5 ºC	Moderada	1 a 2 min.	1 a 2 ºC / año	Moderado		
	J - Hierro/Constantan	-200 ºC a 1200 ºC	10 µV/ºC	±1,5 ºC	Moderada	1 a 2 min	1 a 2 ºC / año	Moderado		
	K - Cromel/Alumel	-40 ºC a 1100 ºC	10 µV/ºC	±1,5 ºC	Moderada	1 a 2 min	1 a 2 ºC / año	Moderado		
	R - Platino 13% Rodio/Platino	0 ºC a 1600 ºC	10 µV/ºC	±1 ºC	Moderada	1 a 2 min	1 a 2 ºC / año	Medio		
	S - Platino-10% Rodio/Platino	0 ºC a 1600 ºC	10 µV/ºC	±1 ºC	Moderada	1 a 2 min	1 a 2 ºC / año	Medio		
	B - Platino 30% Rodio/Platino 6% Rodio	600 ºC a 1600 ºC	10 µV/ºC	±1 ºC	Moderada	1 a 2 min	1 a 2 ºC / año	Moderado		
	N - 84,6% Níquel-14% Cromo-1,4% Silicio)/(95,6% Níquel-0,4% Silicio	0 ºC a 2300 ºC	10 µV/ºC		Moderada	1 a 2 min	1 a 2 ºC / año	Moderado		
Pirómetro de radiación	Ópticos de desaparición de filamento	700 ºC a 4000 ºC	Baja	1% a 2%	Moderada	1 a 3 seg	—			Depende condiciones entorno y objeto, la emisividad varía, errores en la lectura de la temperatura
	Infrarrojos	0 ºC a 4000 ºC	Media	±0,3%	Moderada	5 ms	—			
	Fotoeléctrico	15 ºC a 3000 ºC	Media	±0,5 ºC	Moderada	0,2 a 0,5 seg	—		Medidas precisas de bajas temperaturas	
	Dos colores	900 ºC a 3000 ºC	Alta	±0,5% a ±2%	Moderada	0,2 a 0,5 seg	—		Bastante exacto, excelente en los cuerpos grises, permite medir a través de humos y vapores, emisividad compensada	Susceptibles al ruido eléctrico, errores relativamente grandes si un color es afectado
	Radiación total	450 ºC a 1750 ºC	Media	±0,5 ºC	Moderada	1 a 2 seg	—		Es preciso (no necesariamente exacto) ante condiciones repetitivas del proceso	Depende condiciones objeto, errores en laectura de la temperatura
	Lápices y lacas	500 ºC	Baja	±1%	—	—	—		Barato	Inexacto

Tabla 6.12 continuación Características de los medidores de temperatura



Capítulo 7
Otras variables

En los capítulos anteriores se ha estudiado la medición y transmisión de las variables de proceso más comunes que se encuentran en la industria: la presión, el caudal, el nivel y la temperatura.

Existen otras muchas variables que son también de interés industrial y que pueden clasificarse como físicas y químicas.

Las *variables físicas* son aquellas relacionadas con las causas físicas que actúan sobre un cuerpo, con su movimiento o bien con las propiedades físicas de las sustancias. Entre ellas, estudiaremos el peso, la velocidad, la densidad y el peso específico, la humedad y el punto de rocío, la viscosidad y la consistencia, la llama, el oxígeno disuelto, la turbidez y la radiación solar.

Las *variables químicas* están relacionadas con las propiedades químicas de los cuerpos o con su composición. Entre ellas, se encuentran la conductividad, el pH, redox y la composición de los gases en una mezcla.

7.1 Variables físicas

7.1.1 Peso

El peso de un cuerpo es la fuerza con que es atraído por la Tierra. La relación entre la masa del cuerpo, es decir, la cantidad de materia que contiene, y su peso viene dado por la expresión:

$$P = m \times g$$

en la que:

P = peso

m = masa

g = aceleración debida a la gravedad

Como la masa de un cuerpo es constante y la aceleración de la gravedad varía con el lugar (es de 9,78 en el ecuador y 9,83 en los polos) y también con la altura, es obvio que el peso del cuerpo variará según el lugar de la Tierra y la altura a los que esté sobre el nivel del mar.

Esto es evidente efectuando la medida con una balanza o resorte. Sin embargo, en una balanza clásica de cruz, la medida se efectúa por comparación con masas conocidas y, como éstas están sometidas también a la misma fuerza de gravitación, la lectura será independiente del lugar donde se realiza la medición. Asimismo, como los demás tipos de básculas se ajustan usualmente con pesos patrón, las medidas realizadas serán también independientes de las variaciones de g respecto a la altura y al lugar de la Tierra donde estén instaladas.

Otro factor que influye en la medición es la diferencia de empuje del aire (por el principio de Arquímedes) sobre el cuerpo y sobre el peso patrón; su influencia es tan pequeña que el error cometido queda comprendido dentro del error normal aceptado en las operaciones de pesaje.

En la industria interesa determinar el peso de las sustancias en las operaciones de inventario de materias primas, de productos finales, en la mezcla de ingredientes, etc.

Existen varios métodos para medir el peso:

1. Comparación con otros pesos patrones (balanzas y básculas).
2. Células de carga a base de galgas extensométricas.
3. Células de carga hidráulicas.
4. Células de carga neumáticas.

La comparación con otros pesos patrones la realizan las balanzas y las básculas.

La *balanza clásica* está constituida por una palanca de brazos iguales, llamada cruz, que se apoya en su centro y de cuyos extremos cuelgan los platillos que soportan los pesos. Puede medir desde unos pocos gramos hasta 300 kg. La balanza de Roberval consiste, esencialmente, en un paralelogramo articulado que puede oscilar alrededor del punto central del lado superior del paralelogramo, manteniéndose verticales las varillas laterales que soportan los platillos; se caracteriza porque su equilibrio se alcanza independientemente de la posición de los pesos en los platillos. Su campo de medida llega hasta los 40 kg y se emplea en las operaciones de llenado o de comprobación de pesos de objetos terminados. En las figuras 7.1a y 7.1b pueden verse estos dos tipos de balanzas.

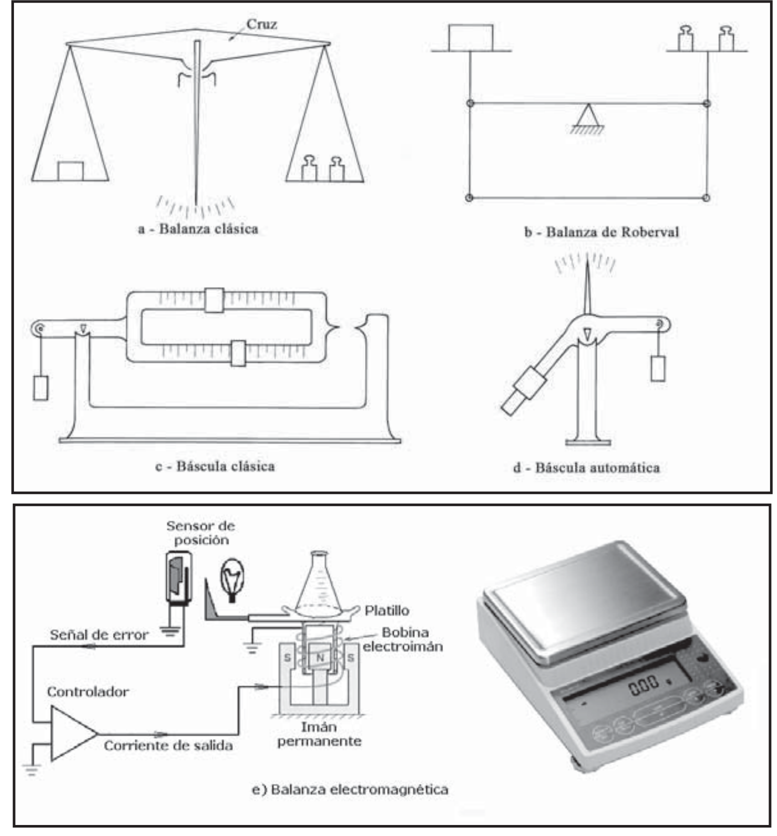


Figura 7.1 Balanzas y básculas

La *báscula clásica* (figura 7.1c) consiste, esencialmente, en una palanca apoyada en un punto de la que cuelgan, en un extremo el peso a medir y en el otro que tiene la forma de un rectángulo, dos pesos móviles uno para ajuste basto y otro para ajuste fino; un fiel indica cuándo la báscula está ajustada. La *báscula automática* (figura 7.1d) consiste en una palanca en ángulo, apoyada en su centro, con un peso conocido en un extremo y el desconocido en el otro. La báscula alcanza siempre una posición de equilibrio marcando, directamente, en una escala graduada y se le puede adaptar fácilmente una máquina impresora o transmisora del peso.

Las balanzas y las básculas son sencillas y de gran exactitud pudiendo alcanzar las primeras del orden del ± 0,002% al ± 0,05% y las segundas del ± 0,1%. Sin embargo, presentan los inconvenientes de su lenta velocidad de respuesta, la posible corrosión que ataca al juego de palancas, en particular en los puntos de apoyo y que es debida a la suciedad, al polvo, a los vapores y a la humedad presentes en ambientes industriales y al desgaste de las piezas móviles, lo que redunda en perjuicio de la precisión de las pesadas.

La *balanza electromagnética* (figura 7.1e) utiliza un sensor de posición y una bobina de par montados en un servosistema que equilibra un peso patrón y el peso desconocido. La señal eléctrica de salida del controlador, que genera la corrección del desplazamiento provocado por el peso, crea un campo magnético en la bobina del electroimán que equilibra la atracción del imán permanente. El sistema permite, mediante un microprocesador, proporcionar una tara automática, unas rutinas estadísticas con cálculo de la media y la desviación estándar de las pesadas y una compensación de la temperatura. Puede añadirse un módulo de comunicaciones para el envío del valor de la pesada. La exactitud típica es de 1 mg en 500 gramos.

La célula de carga a base de *galgas extensiométricas* (figura 7.2) consiste, esencialmente, en una célula que contiene una pieza de elasticidad conocida (tal como el acero de módulo de elasticidad 2,1 x 10^6 bar) capaz de soportar la carga sin exceder de su límite de elasticidad. A esta pieza se encuentra cementada una galga extensiométrica, que puede estar formada por varias espiras de hilo (0,025 mm) pegado a un soporte de papel o de resina sintética, o bien puede estar formada por bandas delgadas unidas con pegamento a la estructura sometida a carga (figura 7.2). Esta operación de pegado parece sencilla pero es un trabajo de artesano, absolutamente esencial, para obtener lecturas exactas y estables de las tensiones presentes en la estructura, por ejemplo, el peso.

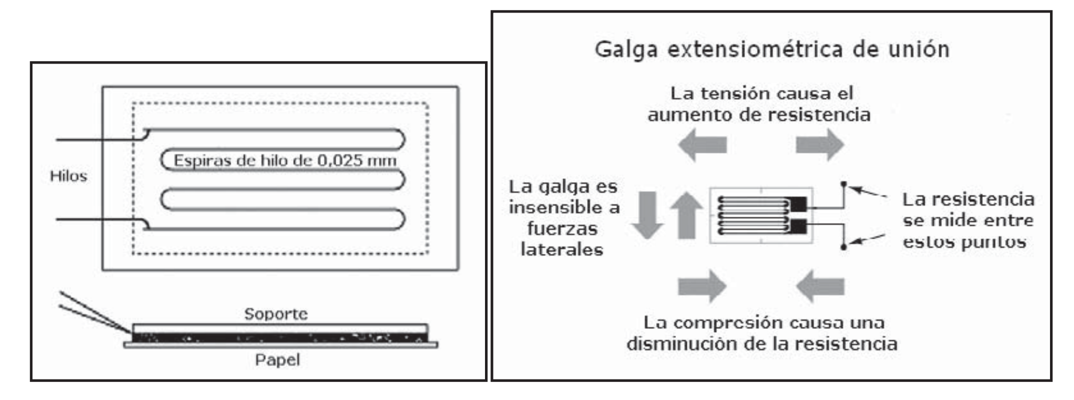


Figura 7.2 Galga extensiométrica

La tensión o la compresión a que el peso somete a la célula de carga hacen variar la longitud del hilo metálico y modifican, por lo tanto, su resistencia eléctrica.

Esta resistencia es igual a:

$$R = \rho \frac{l_o}{A_o} = \rho \frac{l_o + \Delta l}{A_o - \Delta A}$$

siendo:

R = resistencia del hilo

l_o = longitud inicial sin tensión

Δl = Incremento de longitud

ΔA = Incremento de área

Como el volumen del hilo es constante, antes y después de someterse a tensión, resulta:

$$V_o = l_o A_o = (l_o + \Delta l) \times (A_o - \Delta A)$$

$$R = \rho \frac{l_o}{A_o} = (1 + 2 \frac{\Delta l}{l_o})$$

Con lo que el cambio de resistencia es:

$$\Delta R \approx 2 R_o \frac{\Delta l}{l_o}$$

En realidad, se usa el llamado factor de galga igual a:

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}$$

Que en los metales se aproxima a 2.

La temperatura influye mucho en la medida. Por ejemplo, el cambio de 1 °C da lugar a una variación de resistencia de:

$$\Delta Rt = R_o \alpha \Delta t$$

Si la resistencia es de 100 Ω, el coeficiente (α = 0,004/°C), y la relación $\Delta l / l_o$ 1000 µm/m resulta:

Sin variación de temperatura:

$$\Delta R = 2 \times 100 \times 0{,}001 = 0{,}2\ \Omega$$

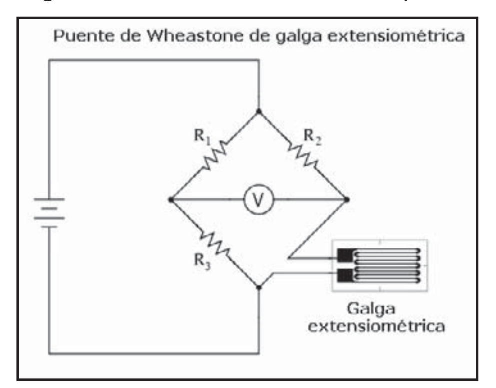
Con 1 °C de variación de temperatura:

$$\Delta Rt = 100 \times 0{,}004 \times 1 = 0{,}4\ \Omega$$

que es prácticamente el doble que el cambio de resistencia debido a la tensión.

Se usan acondicionadores de señal, que son puentes de Wheatstone, que captan pequeños cambios en la resistencia y compensan los efectos de la temperatura. En la figura 7.3a puede verse un circuito elemental que tiene el inconveniente de la resistencia variable de los hilos de conexión de la galga al puente y en la figura 7.3b un circuito completo con cuatro galgas (una en cada brazo del puente) de mayor sensibilidad.

En este segundo circuito una carga de 453 Kg (1000 libras) desequilibra el puente en 15 mV/Voltio de excitación. La adición de un microprocesador eleva la exactitud de la medida mediante la utilización de algoritmos de corrección de errores y facilita el ajuste y la calibración.



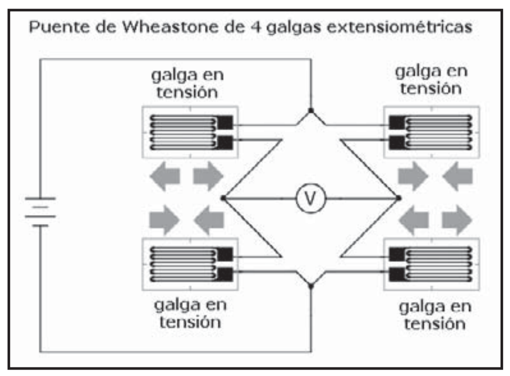


Figura 7.3 Circuitos de puente de Wheastone de galgas extensiométricas

La *galga extensiométrica de semiconductor* cambia de resistencia con la tensión gracias a cambios en la estructura cristalina que varían la movilidad de los electrones. El factor de galga es mayor que en las galgas metálicas, siendo del orden de -50 a -200. El acondicionador de señal también es un puente de Wheatstone con la posibilidad de añadir un circuito al microprocesador.



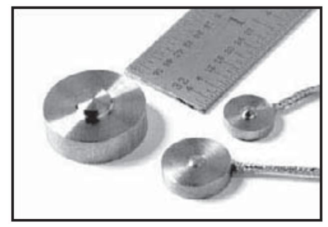




Figura 7.4 Célula de carga de compresión y báscula camiones. Fuente: Wikipedia

La *célula de carga* es el conjunto sellado y encapsulado del puente y las galgas, provisto de puntos mecánicos de fijación para unirlo a la estructura, siendo adecuada para la mayor parte de las aplicaciones industriales de pesaje.

En los instrumentos de pesaje se aplican las normas metrológicas de la OIML (Organización Internacional de Metrología Legal) que clasifican los aparatos en cuatro clases y dos categorías (laboratorio e *in situ*), según la norma UNE-EN ISO/IEC 17025: 2005 (CGA-ENAC-LEC) y la Norma UNE-EN 45501:1995 *Aspectos metrológicos de los instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático*.

Exactitud especial – Clase I (UNE EN 45501:1995): 1 mg a 30 Kg

Exactitud fina – Clase II (UNE EN 45501:1995): máximo 3.000 Kg

Exactitud media – Clase III (UNE EN 45501:1995): máximo 150.000 Kg

Exactitud ordinaria – Clase IV (UNE EN 45501:1995): máximo 150.000 Kg

El microprocesador aporta compensación de temperatura al realizar medidas promedio e ignora los cambios de señal de las células debidos a variaciones de la temperatura; facilita la carga repetitiva al controlar la diferencia de pesada del contenedor con relación al peso deseado; proporciona la comunicación con el sistema de control del proceso; utiliza código de barras para automatizar la pesada; con un montaje adecuado, es inmune a la influencia del viento y a las interferencias electromagnéticas; y con seguridad intrínseca incorporada puede trabajar en atmósferas explosivas.

Las células están protegidas contra la humedad y el polvo, tienen una exactitud del 0,03% al 0,25%, admiten indicación a distancia y pueden medir pesos de 20 kg a más de 150 Tm. Necesitan compensación de temperatura del hilo de resistencia y de la pieza de acero deformable, y son relativamente caras.

Las *células de carga hidráulicas* (figura 7.5) consisten en un pistón sobre el que se apoya la carga, que ejerce una presión sobre un fluido hidráulico. Según la carga, y de acuerdo con el área conocida del pistón, se crea una presión en el aceite que puede leerse en un manómetro Bourdon y que, por lo tanto, refleja indirectamente la carga. Sumando las presiones hidráulicas de varias células de carga y aplicándolas a un transmisor electrónico o digital se obtiene una señal que puede leerse en un indicador y utilizarse en sistemas de pesaje electrónicos.

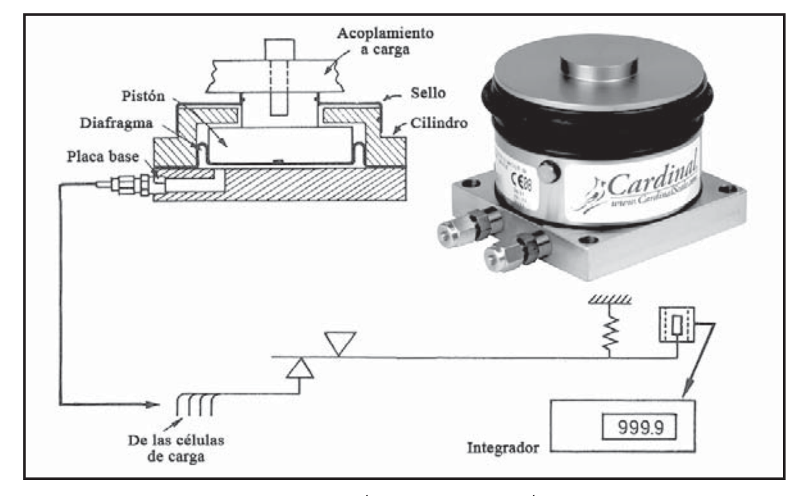


Figura 7.5 Célula de carga hidráulica

Las células de carga hidráulicas se fabrican para unas capacidades de carga de 1.200 kg hasta 4.500 Tm, son de respuesta rápida (menos de 2 segundos), su exactitud es del ± 0,25%, admiten sobrecargas hasta el 40%, pueden fabricarse a prueba de explosión y son resistentes a vibraciones.

Las *células de carga neumáticas* (figura 7.6) consisten en un transmisor neumático de carga de equilibrio de fuerzas, en el que el peso situado en la plataforma de carga se compara con el esfuerzo ejercido por un diafragma alimentado a una presión de tarado ajustable.

El sistema adopta una posición de equilibrio gracias al conjunto tobera-obturador y a la cámara de realimentación del transmisor. La presión del aire alcanzada en esta cámara indica el peso. La capacidad de carga de las células neumáticas varía de 10 kg a 10 Tm, poseen una exactitud del ± 0,2% y se adaptan fácilmente al control neumático. Tienen la ventaja de ser insensibles a los cambios de temperatura, ser higiénicas y a prueba de explosión, con el inconveniente de precisar aire comprimido de instrumentos (limpio y seco) o de nitrógeno y de ser de respuesta relativamente lenta.

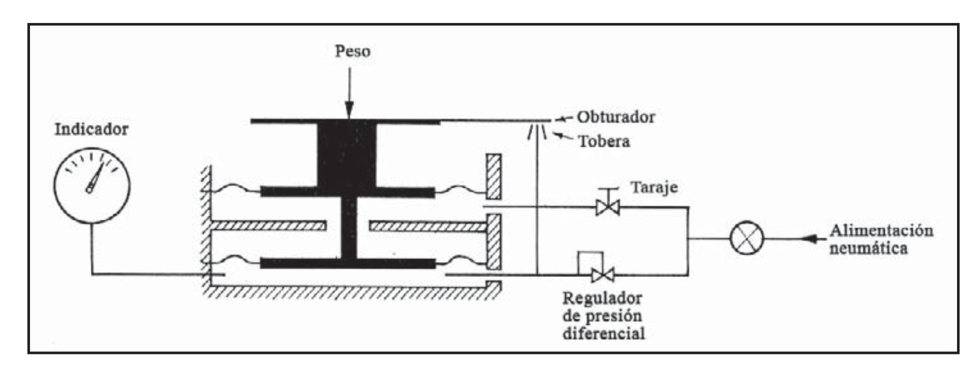


Figura 7.6 Célula de carga neumática

Una comparación de los sistemas de medida del peso puede verse en la tabla 7.1.

Sistema	Capacidad	Exactitud	Ventajas	Desventajas
Balanza	Gramos a 300 Kg	± 0,002% a ± 0,05%	Simple, exacta, barata	Respuesta lenta, corrosión local
Báscula	Gramos a toneladas	± 0,1%	Simple, exacta, barata	Respuesta lenta, corrosión local
Galga extensiométrica	20 Kg a 150 Tm	± 0,03% a ± 0,25%	Instalación simple, indicación a distancia, protegida contra la corrosión	Caras, compensación de temperatura
Célula hidráulica	1200 Kg a 4500 Tm	± 0,25%	Instalación simple, resistente a vibraciones, admite 40% de sobrecarga,. A prueba de explosión, indicación a distancia. Respuesta rápida.	Caras, transmisor electrónico para sumar señales de varias células. Afectada por la temperatura. Calibración frecuente.
Célula neumática	10 Kg a 10 Tm	± 0,2%	Se adapta bien a control neumático, indicación a distancia	Aire instrumentos. Afectada por la temperatura. Calibración frecuente. Respuesta lenta.

Tabla 7.1 Sistemas de medida de peso

7.1.2 Velocidad

En la industria, la medición de la velocidad se efectúa de dos formas: con tacómetros mecánicos y con tacómetros eléctricos. Los primeros detectan el número de vueltas del eje de la máquina por

medios exclusivamente mecánicos, pudiendo incorporar o no la medición conjunta del tiempo para determinar el número de *revoluciones por minuto* (r.p.m.), mientras que los segundos captan la velocidad por sistemas eléctricos.

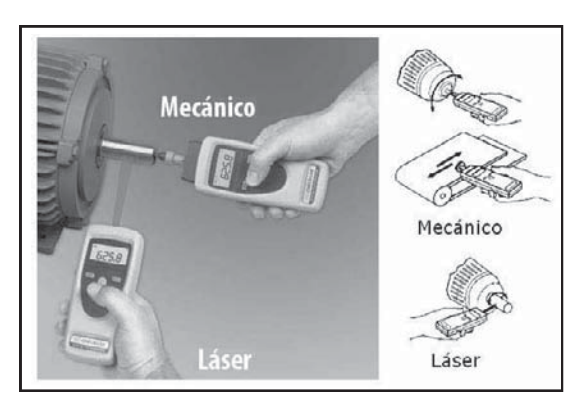


Figura 7.7 Tacómetro mecánico

Los tacómetros mecánicos disponen de una punta cónica de goma que ajusta en el hueco cónico del eje de la máquina. El tacómetro láser permite medir la velocidad sin contacto con el eje de la máquina (figura 7.7).

Para usos industriales, se suelen utilizar los tacómetros eléctricos porque permiten la transformación directa de la señal para alimentar los instrumentos registradores o controladores de panel.

El tacómetro de *corrientes parásitas* (figura 7.8) es en el que el eje de la máquina hace girar un imán dentro de una copa de aluminio, induciendo corrientes parásitas en el aluminio que crean un par resistente proporcional a la velocidad. Un resorte frena el cabezal del aluminio quedando éste en una posición que se señala en un dial. El par resistente del cilindro de aluminio se aplica a un sistema neumático o electrónico o digital. El campo de medida es de 0 a 15.000 r.p.m.

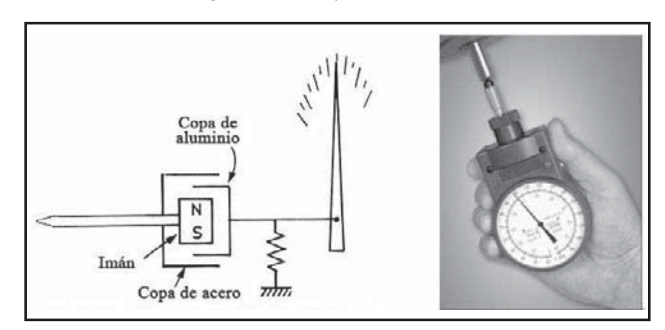


Figura 7.8 Tacómetro de corrientes parásitas

El *tacómetro de c.a.* consiste en un rotor dotado de un imán permanente que gira dentro de un estator bobinado multipolar. El campo magnético móvil del imán induce una corriente alterna en el bobinado, que es proporcional a la velocidad de rotación.

El *tacómetro de corriente continua* o *dínamo tacométrica* (figura 7.9) consiste en un estator de imán permanente y un rotor con un entrehierro uniforme. La tensión continua recogida en las es-

cobillas del rotor es proporcional a la velocidad de la máquina en r.p.m. Esta tensión puede leerse en un voltímetro indicador calibrado en r.p.m., o bien alimentar un instrumento potenciométrico a través de una resistencia divisora de tensión. La polaridad de las escobillas indica el sentido de giro del eje.

La exactitud en la medida alcanza el ± 0,5% para velocidades que llegan hasta las 6000 r.p.m.

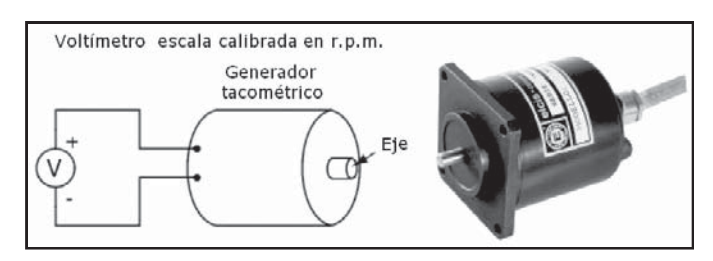


Figura 7.9 Dínamo tacométrica

Se utilizan en la medida de las velocidades de motores eléctricos, cintas transportadoras, máquinas herramientas, ventiladores, etc.

El *tacómetro de frecuencia* o *frecuencímetro* (figura 7.9) mide la frecuencia de la señal de c.a. captada por transductores del tipo magnético, capacitivo u óptico que dan impulsos, cuyo número es proporcional a la velocidad de giro de la máquina. El transductor no tiene contacto mecánico con el eje rotativo.

Puede ser de *frecuencia incremental* si utiliza un sensor de proximidad, magnético o capacitivo, muy próximo al componente móvil. Este componente de la máquina puede ser diente de engranaje, cabezas de tornillo, etc. Un modelo es el sensor magneto-resistivo que se basa en que un material conductor de corriente, por ejemplo, el permalloy, cambia su resistividad en presencia de un campo magnético externo. Detecta los campos magnéticos originados por movimientos de piezas del orden de centésimas de mm.

El número de impulsos de salida de un sensor angular, es:

$$N = \frac{\pi \times D}{2A}$$

en la que:

D = diámetro del disco

A = ancho/diámetro de cada sector codificado

Su campo de media es de 0,01 r.p.m. a 120.000 r.p.m. Su exactitud es de 1 dígito, o bien ± 0,1%. Su señal de salida es de 0 a 10 V c.c.

Otro modelo es el de *frecuencia absoluta* que da como señal de salida una señal codificada, correspondiente a la posición de un elemento móvil (regla o disco) con relación a una referencia interna. Dispone de varias pistas, representando cada una un bit de salida y con zonas diferenciadas con un sistema de codificación de código binario natural (indicación de velocidad), o código BCD (*Binary Coded Decimal*) (comunicaciones) o código Gray (identificación posición). Un sistema simple dispone de un disco opaco, perforado periféricamente y acoplado al eje cuya velocidad desea medirse,

de una fuente de luz y de una fotocélula. Ésta genera una frecuencia dependiente de los impulsos luminosos que pasan a través del disco, es decir, es función de la velocidad.

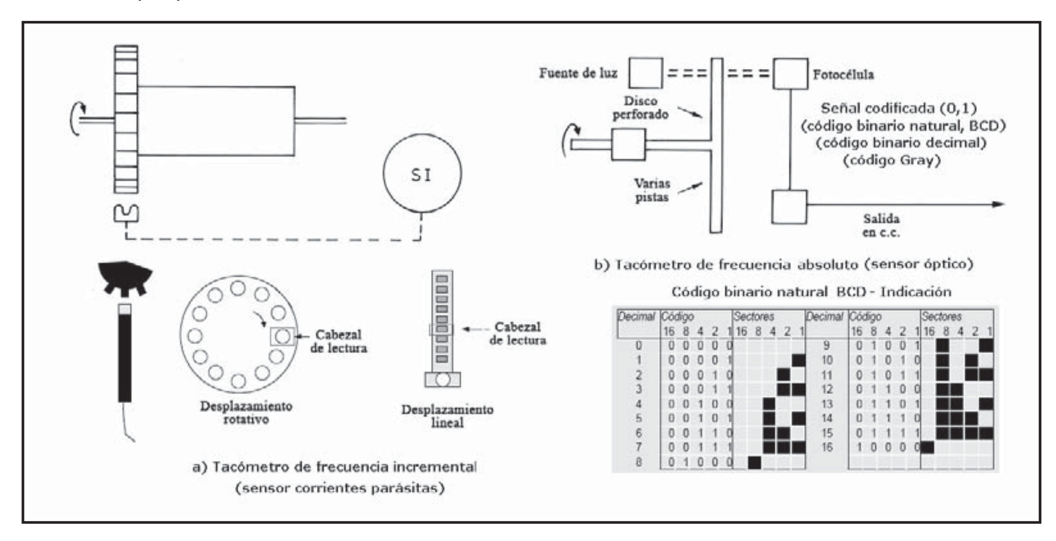


Figura 7.10 Tacómetro de frecuencia

7.1.3 Densidad y peso específico

7.1.3.1 Introducción

La *densidad* o *masa específica* de un cuerpo se define como su masa por unidad de volumen, expresándose normalmente en g/cm^3 (o kg/m^3). Como la densidad varía con la temperatura y con la presión (en los gases), se especifica para un valor base de la temperatura que en líquidos suele ser de 0 °C o de 15 °C, y en los gases de 0 °C y para un valor estándar de la presión que en los gases es de 1 atmósfera. La densidad relativa es la relación para iguales volúmenes de las masas del cuerpo y del agua a 4 °C en el caso de líquidos, y en los gases la relación entre la masa del cuerpo y la del aire en condiciones normales de presión y de temperatura (0 °C y 1 atmósfera).

Evidentemente, la densidad relativa no tiene dimensiones. Además, hay que señalar que, siendo la densidad del agua de 1 g/cm^3 a 4 °C, los valores numéricos de la densidad relativa de un líquido coinciden con los de la densidad.

El peso específico es el peso del fluido por unidad de volumen. Por lo tanto, entre el peso específico y la densidad existirá la relación:

$$Peso\ específico = densidad \times g$$

Siendo g la aceleración debida a la gravedad. Si el peso específico y la densidad se refieren al agua ,en el caso de líquidos, o al aire, en el caso de gases (densidad relativa), como g tiene el mismo valor en el lugar en donde se efectúa la medición, resultará que el peso específico relativo será igual a la densidad relativa. Por esto, en el lenguaje vulgar suelen tomarse como sinónimos:

$$Peso\ específico = densidad \times g$$

$$Peso\ específico\ agua = densidad\ agua \times g$$

Otras unidades de medida de densidad son las siguientes:

- *Grados API*, empleados para productos petrolíferos, que están normalizados por el *American Petroleum Institute* y que equivalen a:

$$\frac{141,5}{densidad\ \ relativa\ \ a\ \ 15ºC} - 131,5$$

- *Grados Baumé*, empleados para ácidos, jarabes, etc., que equivalen a:

$$\frac{140}{densidad\ \ relativa\ \ a\ \ 15ºC} - 130$$

  para líquidos más ligeros que el agua;

$$145 - \frac{145}{densidad\ \ relativa\ \ a\ \ 15ºC}$$

  para líquidos más pesados que el agua.

- *Grados Brix*, empleados casi exclusivamente en la industria azucarera. Representan el tanto por ciento en peso de azúcar en solución a 17,5 °C.

En los procesos industriales, la densidad es una variable cuya medida es vital a veces. Tal es el caso de la determinación de la concentración de algunos productos químicos como el ácido sulfúrico, la medida exacta del caudal en gases o vapores que viene influida por la densidad, la medida de la densidad en un producto final que garantiza las cantidades de los ingredientes que intervienen en la mezcla, etc.

Entre los diversos métodos de medida de densidad figuran los que siguen.

7.1.3.2 Areómetros

Los *areómetros* (figura 7.11) consisten en un flotador lastrado, en su parte inferior, con un vástago superior graduado. El aparato se sumerge hasta que su peso es equilibrado por el líquido que desaloja, hundiéndose más cuanto menor sea la densidad del líquido. Puede graduarse en cualquiera de las unidades anteriores. Incorporándole un transductor de inductancia variable, con la armadura fija en la parte inferior del flotador y con la bobina dispuesta en el exterior del recipiente, es posible transmitir eléctricamente a distancia la densidad, siempre que se mantenga una altura constante del líquido con un rebosadero (figura 7.11b).

Una variante del areómetro anterior (figura 7.11c) consiste en un flotador con un lastre en forma de cadena sujeta a un punto fijo del recipiente. El flotador está completamente sumergido dentro del líquido y, según su densidad, se sumerge más o menos variando proporcionalmente el peso efectivo de la cadena. Un transformador diferencial (LVDT = *Linear Variable Differential Transformer*) capta la posición del flotador y da una señal de salida en c.a., función de su desplazamiento y compensa las variaciones de densidad causadas por los cambios de temperatura en el fluido mediante una sonda de resistencia.

La exactitud general de los areómetros es del ± 1% al ± 3% y admiten presiones y temperaturas máximas de servicio de 6 a 8 bar y 120 a 230 °C, respectivamente. Las viscosidades inferiores a 50 centipoises no influyen en la lectura. A viscosidades superiores, o con caudales elevados, conviene

trabajar con un caudal intermitente, para así captar la posición del flotador durante los períodos de flujo nulo. Su campo de medida de densidad relativa es de 0,5 a 4 y disponen de compensación de temperatura. Son aptos para trabajar con líquidos limpios.

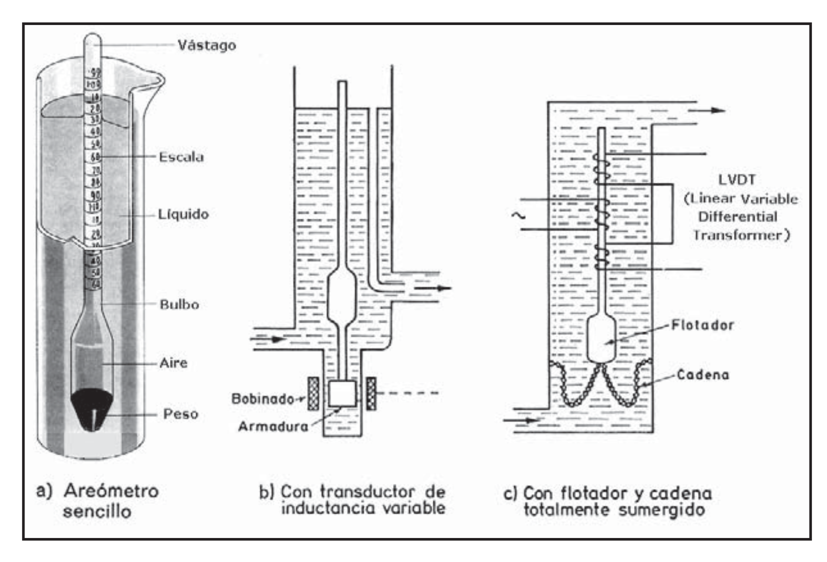


Figura 7.11 Areómetros

7.1.3.3 Métodos de presión diferencial

En la medida de densidad por presión diferencial se fijan dos puntos, en el tanque o en una tubería vertical, del proceso y se les conecta un instrumento de presión diferencial, bien directamente o bien a través de una cámara de medida. Como la diferencia de alturas es fija en el líquido, la única variable que altera la presión diferencial es la densidad, siempre que no varíe la temperatura. En el caso de medición directa del contenido másico mediante presión hidrostática (HTG = *Hydrostatic Tank Gauging*), donde interesa la máxima exactitud, se usa una sonda de resistencia Pt100, lo que permite compensar las diferencias de densidad obtenidas.

La presión diferencial medida por el instrumento es:

$$P = h \times \gamma \times g$$

Si el campo de medida de densidad del líquido es de 0,8 a 0,9 y el instrumento a emplear tiene un margen de 0 a 100 mm c. de a., la distancia entre las tomas será:

$$h = \frac{100 \times g}{(0.9 - 0.8) \times 1000 \times g} = 1\ m$$

Como la lectura de densidad debe empezar en 0,8, el instrumento debe tener una elevación de:

$$100 \times 0{,}8 = 80\ mm\ c.d.a. = 0{,}00784\ bar$$

Ya que la presión diferencial mínima es:

$$1\ m \times 0{,}8 = 800\ mm\ c.d.a. = 0{,}0784\ bar$$

Y la presión diferencial máxima es de:

$$1\ m \times 0{,}9 = 900\ mm\ c.d.a. = 0{,}0882\ bar$$

En el caso de fluidos no demasiado limpios, muy viscosos o corrosivos, existe el riesgo de que las conexiones al instrumento se obturen o se destruyan.

En este caso puede emplearse el sistema de purga de aire o de gas, e incluso de líquido (figura 7.12b), a través de dos tuberías colocadas en el seno del líquido y cuyos extremos están separados una distancia fija. En el ejemplo anterior esta separación sería de 1 m y el instrumento debería disponer de un resorte de elevación ajustado a 80 mm de c. d. a.

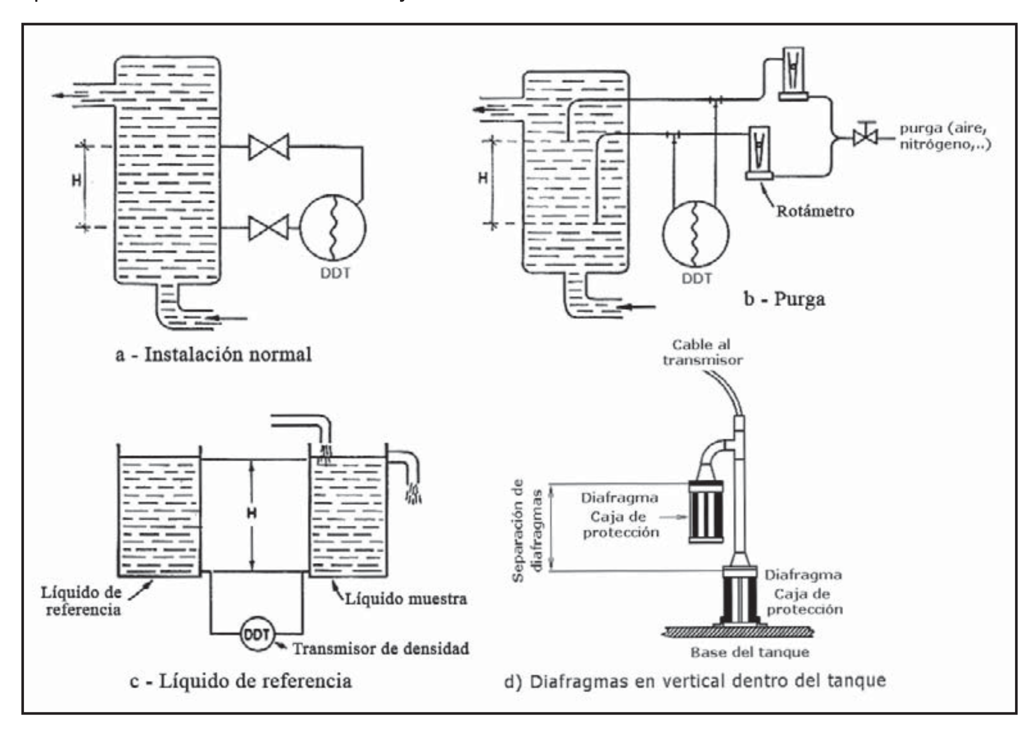


Figura 7.12 Medida de densidad por presión diferencial

En otro sistema utilizado, en cámaras de medida a presión atmosférica, se llena el ramal de menor presión del instrumento con un líquido de altura constante, que sirve como referencia (figura 7.12c), cuya densidad puede ser mayor o menor que la del líquido de proceso.

Estos instrumentos de presión diferencial tienen una exactitud del ± 0,5% al ± 1% y pueden trabajar con presiones y temperaturas de 300 bar y 170 °C, respectivamente.

7.1.3.4 Método de desplazamiento

En el método de *desplazamiento* (figura 7.13), se emplea un instrumento de desplazamiento o barra de torsión parecido al utilizado en la medición de nivel de líquidos. El flotador está totalmente sumergido en el líquido y está equilibrado, exteriormente, para que el par de torsión desarrollado represente directamente la densidad del líquido.

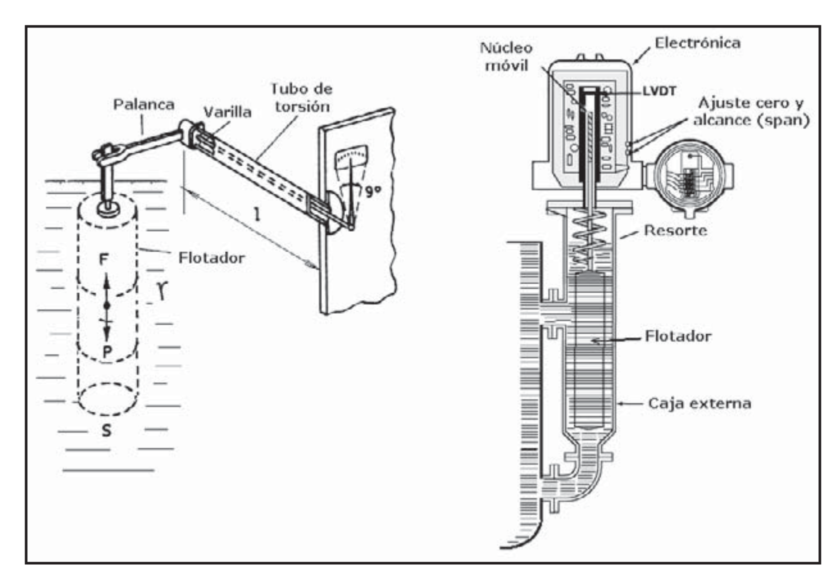


Figura 7.13 Medición de densidad por desplazamiento

El empuje F del líquido sobre el flotador, de peso P y volumen V conocidos, es:

$$F = V \times \gamma = S \times h \times \gamma$$

La fuerza útil que ejerce el flotador es:

$$F_{util} = F - P = S \times h \times \gamma - P$$

Y la densidad del líquido:

$$\gamma = \frac{F_{util} + P}{S \times h}$$

El método de desplazamiento tiene una exactitud del ± 1%, con una amplitud de medida de densidad que puede llegar hasta un mínimo de 0,005. Las presiones y temperaturas de servicio alcanzan los 40 bar y 200 °C. Este sistema puede emplearse en líquidos limpios, no siendo adecuado en los líquidos pegajosos o que tengan sólidos en suspensión, ya que podrían adherirse al flotador y falsear la medida.

7.1.3.5 Refractómetro

Los *refractómetros* (figura 7.14) se basan en la ley de Snell:

$$\acute{I}ndice\ de\ refracci\acute{o}n = \frac{Velocidad\ de\ la\ luz\ en\ el\ aire}{Velocidad\ de\ la\ luz\ en\ el\ medio}$$

En el proceso industrial se utiliza la propiedad de un rayo de luz al pasar de un medio a otro. Al aumentar el ángulo de incidencia del rayo aumenta el ángulo de refracción y el de reflexión es más intenso. Cuando el ángulo de incidencia es crítico, el de refracción llega a los 90°, con lo que sólo existe el de reflexión.

De aquí:

$$\textit{Índice de refracción} \times \textit{Seno ángulo de incidencia} = \textit{Constante}$$

para cualquier rayo de luz incidiendo sobre la superficie que separa dos medios.

El índice de refracción puede relacionarse con la concentración de sólidos del líquido, es decir, inferencialmente con la densidad.

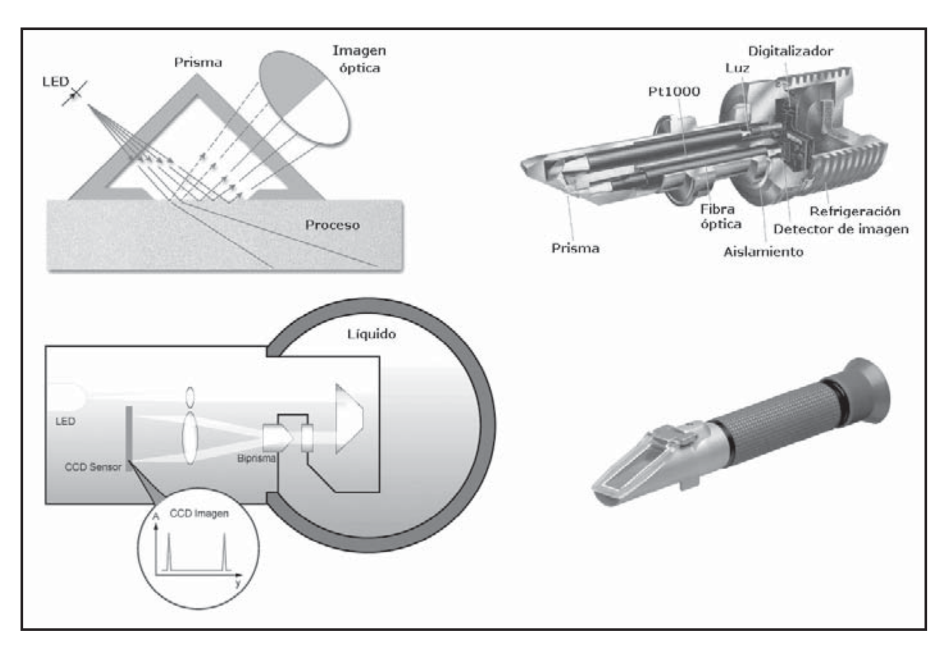


Figura 7.14 Refractómetro. Fuente: ISA

En un refractómetro típico, la luz emitida, en un haz de rayos paralelos por un sensor LED (590 nm línea D del sodio), es reflejada e invertida por un prisma, atraviesa el líquido y es refractada y dividida en dos haces mediante un prisma de medida. Un CCD, que traduce la imagen óptica en electrónica, detecta dos picos de intensidad cuya separación está relacionada con el índice de refracción. Al mismo tiempo, se mide la temperatura del líquido mediante una sonda Pt1000. Al existir una relación determinada entre el índice de refracción, la temperatura y la concentración, el transmisor puede calcular la concentración e, inferencialmente, la densidad.

Los refractómetros no son influidos por los sólidos no disueltos ni por el aire en disolución. El intervalo de medida del índice de refracción es de 1,3 a 1,6 y el intervalo mínimo de densidad es de 0,004. Su exactitud es de 0,0001 g/cm^3. Los líquidos pegajosos o con sólidos en suspensión pueden recubrir el prisma y, entonces, éste precisa de una limpieza periódica que puede ser automática con vapor de agua intermitente. Se emplean en evaporadores, en la concentración de licor negro en la industria papelera, etc.

7.1.3.6 Método de radiación

El método de *radiación* (figura 7.15) se basa en la determinación del grado con que el líquido absorbe la radiación procedente de una fuente de rayos gamma. La radiación residual es medida con un

contador de centelleo que suministra pulsos de tensión, cuya frecuencia es inversamente proporcional a la densidad. Un tubo fotomultiplicador envía una señal proporcional al número de impulsos de luz recibidos y un circuito electrónico genera una señal de 4-20 mA cc. con un protocolo de comunicaciones HART o Foundation Fieldbus.

La intensidad de la radiación residual captada a través del fluido es:

$$I = I_o \times \rho - u' \times \rho \times L$$

en la que:

I_o = radiación de la fuente

u' = coeficiente de atenuación del fluido

ρ = densidad del fluido

L = longitud de la radiación

La fuente de radiación utilizada industrialmente es principalmente el cesio 137, de una vida media de 30 años (también se emplea, en casos especiales, el americio 241, de una vida media de 458 años).

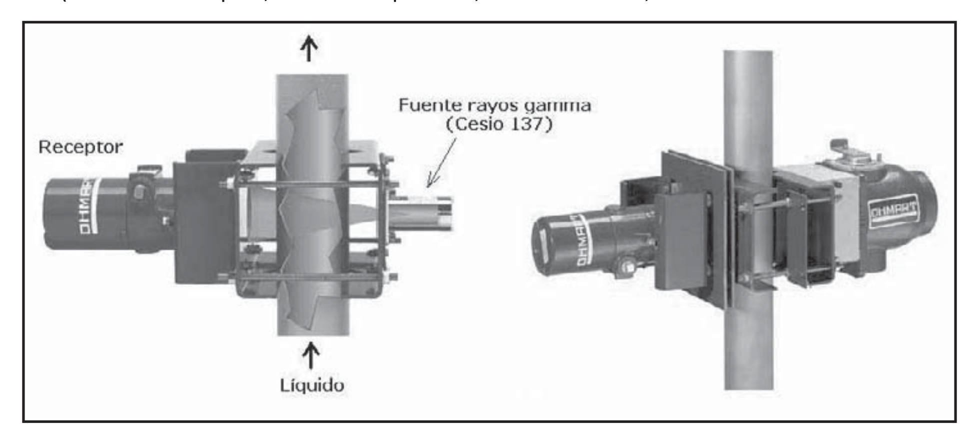


Figura 7.15 Medidor de densidad de radiación. Fuente: Ohmart Vega

Como el coeficiente de atenuación del fluido u' permanece constante para todos los elementos de peso atómico comprendido entre 2 y 30, y la longitud de la radiación es constante, se sigue que la intensidad de radiación residual es directamente proporcional a la densidad del fluido. Físicamente, el instrumento consiste en una tubería, o en un tanque, a cuyo través pasa el líquido, con la fuente blindada dispuesta en la parte exterior de la tubería o del tanque y con el transmisor de la radiación instalado en la parte opuesta.

El instrumento dispone de compensación de temperatura, de linealización de la señal de salida y de reajuste de la pérdida de actividad de la fuente de radiación, extremo, este último, a tener en cuenta para conservar la misma exactitud de la puesta en marcha. Como desventajas, figuran el blindaje de la fuente y el cumplimiento de las leyes sobre protección de radiación.

La exactitud en la medida es del ± 0,5% al ± 2% y el instrumento puede emplearse para todo tipo de líquidos, ya que no está en contacto con el proceso. Su lectura viene influida por el aire o por los gases disueltos en el líquido.

7.1.3.7 Método de punto de ebullición

En el *método de punto de ebullición* se mide la diferencia de temperaturas entre el punto de ebullición del líquido que se está concentrando y el punto de ebullición del agua, en las mismas condiciones de presión. Esta diferencia de temperaturas es función de la densidad del líquido y se mide mediante sondas de resistencia inmersas, una en el líquido y la otra en agua, conectadas a un instrumento diferencial de puente de Wheatstone graduado directamente en densidad o a un transmisor electrónico o digital. Un punto importante es la instalación de la sonda de resistencia del líquido en ebullición, que idealmente debe situarse en la superficie del líquido, lo que no siempre es así, ya que el nivel de un efecto particular del evaporador puede variar. El agua a la misma presión que el líquido se obtiene con una purga de vapor conectada a una pequeña cámara de condensación donde se encuentra la sonda de resistencia; esta cámara está instalada en la tubería de salida del vapor del líquido.

El método de punto de ebullición se emplea en los evaporadores con preferencia.

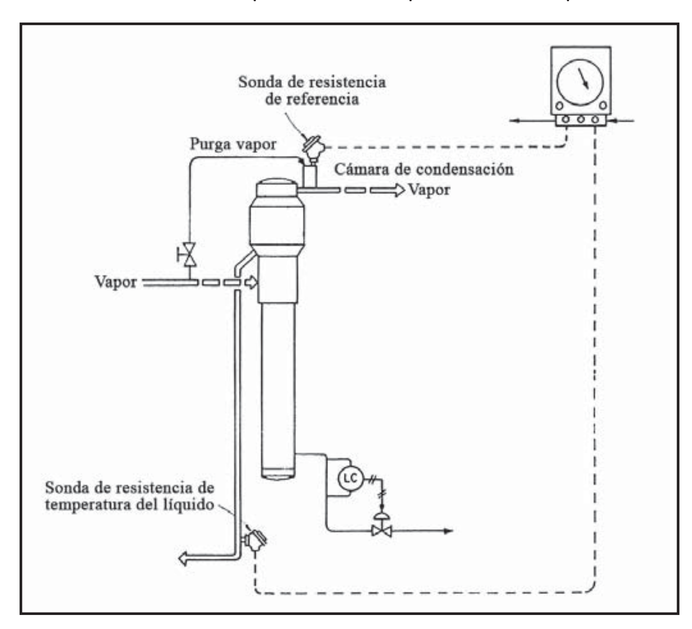


Figura 7.16 Método de punto de ebullición

7.1.3.8 Medidor de ultrasonidos

Mide la velocidad del sonido dentro del fluido e, inferencialnente, calcula su densidad. La medida se realiza disponiendo el conjunto emisor-receptor de ultrasonidos inmerso dentro del líquido o exterior al tanque o a la tubería. Las variaciones de la velocidad del sonido son provocadas por cambios en la densidad, que varían el acoplamiento acústico entre los transductores y el fluido, pero además pueden ser factores perturbadores los cambios en la temperatura, que debe ser compensada, y las variaciones en la viscosidad y en la compresibilidad, por lo que la medida queda restringida a una familia de líquidos de similares características. Por otro lado, si la velocidad del flujo del fluido es importante, las dos velocidades opuestas del sonido desde el emisor al receptor y del receptor al emisor son distintas, y aparece como complicación adicional las variaciones de frecuencia debidas al efector Doppler.

Para compensar debidamente este efecto, es necesario efectuar una medida adicional de la velocidad en otra dirección. La exactitud es del ± 0,2%.

En la figura 7.17 puede verse un esquema de este tipo de medidor.

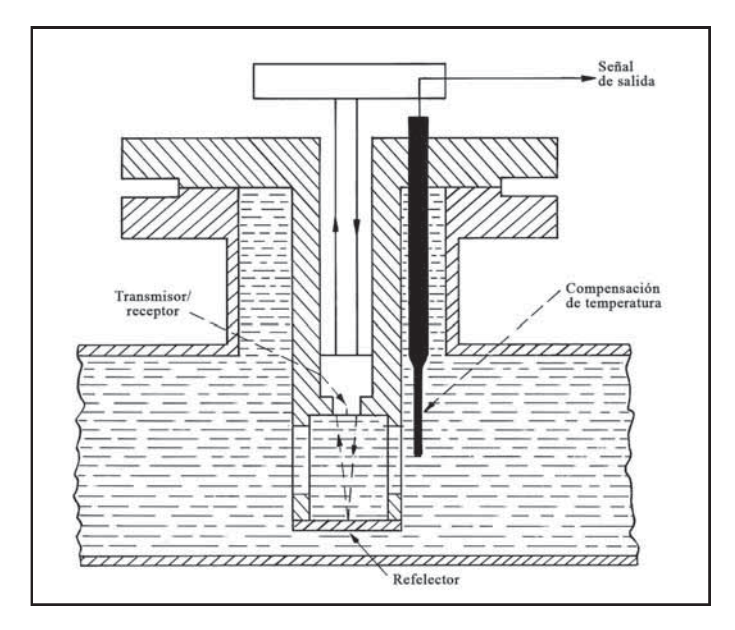


Figura 7.17 Medidor de densidad de ultrasonidos

7.1.3.9 Medidores inerciales

Los *medidores inerciales* se basan en aprovechar la variación de la masa inercial de una masa inmersa en el fluido al entrar, la misma, en vibración dentro de una cámara de volumen constante. Las variaciones de densidad del fluido contribuyen a una carga inercial de la masa, variando su masa efectiva. Como la frecuencia natural de un elemento depende de su masa efectiva, se sigue que midiendo la frecuencia natural, o resonancia de la masa inmersa, se tendrá una medida correlacionada de la densidad del fluido. La temperatura medida del fluido debe compensarse.

La fórmula de cálculo correspondiente es:

$$\rho_o = K_o + K_1 \times T + K_2 \times T^2$$

en la que:

ρ_o= lectura de densidad del aparato

K_o, K_1, K_2 = constantes de calibración de cada aparato

T = oeríodo natural (inverso de la frecuencia natural)

El circuito de medida incorpora un cristal piezoeléctrico para detectar la frecuencia natural en el estado de resonancia de la masa y ésta se mantiene, continuamente en dicho estado, gracias a un circuito de control.

El sistema sirve tanto para la medición de densidad en líquidos como en gases.

Existen varios tipos de medidores inerciales.

El *método de tubo en U* (figura 7.18) consiste en un tubo que tiene forma de U y que incorpora una armadura rígida. Una parte del tubo en U vibra a su frecuencia de resonancia natural mediante un sistema eléctrico de retroalimentación, formado por una bobina excitadora alimentada por una corriente pulsante. Un cambio en la densidad del fluido varía la frecuencia de resonancia e induce una corriente alterna en una bobina receptora. Esta corriente es convertida a una señal de corriente continua y enviada a un controlador.

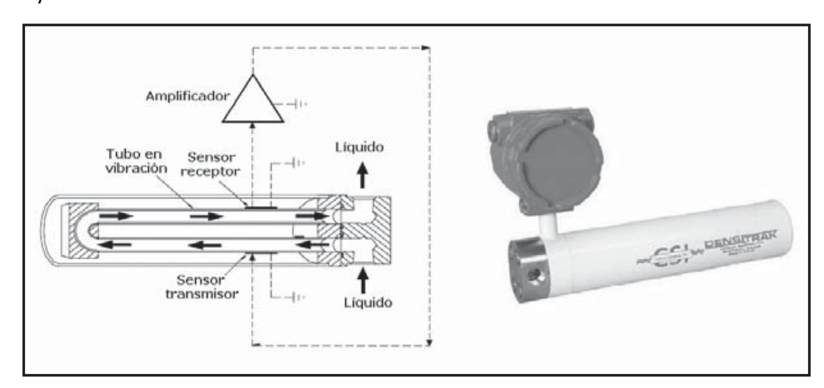


Figura 7.18 Método de tubo en U oscilante. Fuente: Honeywell Enraf

La excitación electromagnética correspondiente hace que el tubo vibre a su frecuencia natural:

$$f = 2 \times \left(\frac{C}{M_0 + V_0 \times \rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

en la que:

f = frecuencia de la vibración

M_0 = masa del tubo

V_0 = volumen en vibración

C = constante de elasticidad

ρ = densidad a medir

La medida es compensada según la temperatura del fluido a su paso a través del tubo.

La exactitud de medida del instrumento alcanza los ± 0,0001 g/cm^3 y puede trabajar a unas presiones y temperaturas máximas de 50 bar y 150 °C, con fluidos viscosos y corrosivos gracias al material del tubo en U. Algunos fluidos tienen tendencia a recubrir el tubo a pesar de la vibración a la que está sometido y obligan a parar el proceso para limpiar el tubo.

En el *método de horquilla* (figura 7.19) la masa en vibración tiene forma de horquilla y está situada en una tubería o tanque. La instalación del instrumento debe cumplir:

- Distancia aguas abajo de una bomba = triple de la velocidad del fluido. Por ejemplo, si la bomba imparte una velocidad al fluido de 1 m/s, la distancia debe ser como mínimo de 3 m.
- Para evitar el recubrimiento de la horquilla con sólidos, la velocidad debe ser > 1 m/s.

- Para evitar la erosión, la velocidad debe ser < 3 m/s.
- Para evitar la aeración del fluido, el líquido debe descargar en el tanque por debajo del nivel.

La exactitud del sistema es del orden de 0,001 g/cm^3 a 0,0001 g/cm^3, o del ± 0,2%.

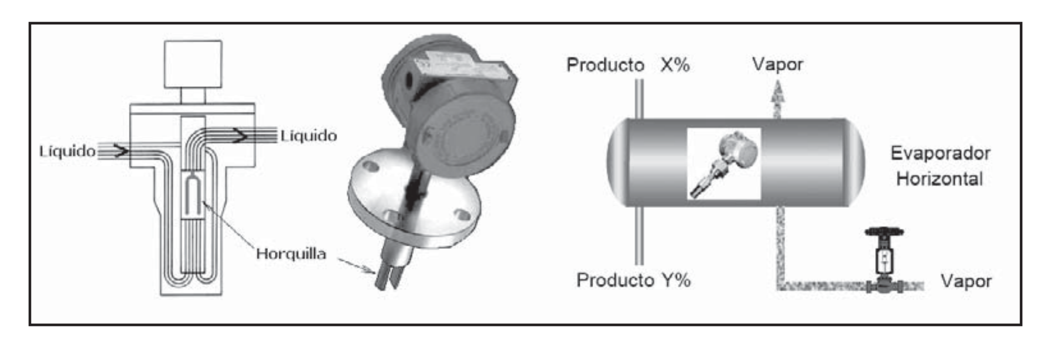


Figura 7.19 *Método de horquilla oscilante. Fuente: Razaghi Meyer International*

7.1.3.10 Medidor de Coriolis

El *medidor de Coriolis* descrito en la medida de caudal masa puede emplearse en la medida de la densidad. En efecto, siendo las características de la vibración en el tubo:

w = frecuencia angular

f = frecuencia

T = período

K = constante de elasticidad

m = masa

m_f = masa del fluido

m_c = masa del medidor

V = volumen interior del tubo sensor

Resulta:

$$m = m_f + m_c$$

$$w = 2\pi f \sqrt{\frac{K}{\rho v + m_c}}$$

Y, despejando:

$$\rho = \frac{KT^2}{4\pi^2 V} - \frac{m_c}{V} = k_1(t_c) \times T^2 - k_2$$

donde t_c es la corrección de temperatura sobre el módulo de elasticidad del tubo.

Utilizando dos fluidos A y B de densidad conocida, resulta:

$$\rho_a = K_1(t_{ca})T_a^2 - K_2$$

$$\rho_b = K_1(t_{cb})T_b^2 - K_2$$

Y, efectuando operaciones:

$$\rho = (\rho_b - \rho_a) - (\frac{t_c T^2 - t_{ca} T_a^2}{t_{cb} T_b^2 - t_{ca} T_a^2}) + \rho_a$$

Por lo tanto, conocidos los períodos del tubo T_a, T_b para dos fluidos A y B a una temperatura conocida, es posible determinar la densidad de un fluido midiendo el período T de la vibración y su temperatura.

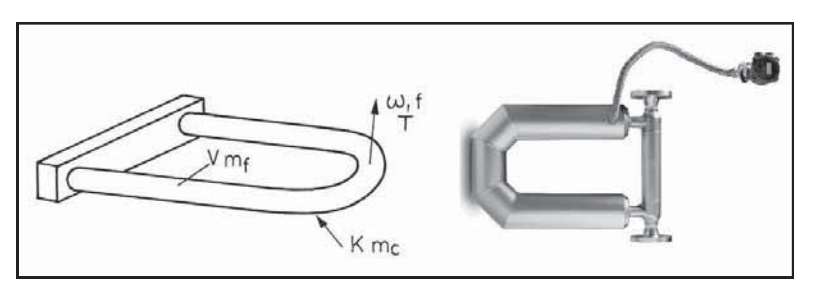


Figura 7.20 Medidor de densidad de Coriolis

La exactitud del sistema es del orden de 0,0005 g/cm³.

Sistema		Exactitud	Amplitud mínima (gr/cm³)	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Areómetro	Sencillo Transductor inductancia Flotador y cadena	± 1% a ± 3%	0,5 a 4	Sencillos	–	Líquidos limpios
Presión diferencial		± 0,5% a ± 1%	0,01	Tanques a presión		Líquidos
Desplazamiento		± 1%	0,005		No puede usarse en líquidos que recubran el flotador	Líquidos
Refractómetro		± 0,0001 gr/cm³	0,004	Insensibles a sólidos y aire	No puede usarse en líquidos que recubran el prisma	Líquidos
Radiación		± 0,5% a ± 2%	0,05	Sin contacto con el proceso	Influido por gases o aire disuelto. Caro. Inspecciones de seguridad de radiación	Líquidos
Punto de ebullición		–	–	Simple montaje en línea	Necesita vapor a la misma presión que el proceso. Instalación sondas de resistencia en la superficie del líquido	Líquidos en evaporadores
Ultrasonidos		± 0,2%	–	Simple montaje en línea	Compensación de temperatura y viscosidad	Líquidos
Medidores inerciales	Tubo en U	± 0,0001 gr/cm³	0,05	Medida en línea a alta presión	Posible recubrimiento del tubo	Líquidos y gases
	Horquilla	± 0,001 gr/cm³ a ± 0,0001 gr/cm³	0,05	Medida en línea a alta presión	Posible recubrimiento del tubo	Líquidos y gases
Coriolis		± 0,0005 gr/cm³		Medida en línea a alta presión	Caro. Posible recubrimiento del tubo	Líquidos y gases

Tabla 7.2 Sistemas de medida de densidad

7.1.4 Humedad y punto de rocío

Las variables humedad y punto de rocío son de extraordinaria importancia en la industria y se utilizan en el acondicionamiento de aire, en atmósferas protectoras empleadas en tratamientos térmicos, en secadores, en humidificadores, en la industria textil, en la conservación de fibras, etc.

En aire o en los gases, se usan varios términos al hablar de humedad o punto de rocío:

Humedad absoluta. Cantidad de agua, en kg, por kg de aire seco.

Porcentaje de humedad. Cociente multiplicado por 100 entre la cantidad, en kg, del vapor de agua contenido en 1 kg de aire seco y la cantidad, en kg, de vapor de agua contenida en 1 kg de aire seco, si el aire está en condiciones de saturación.

Humedad relativa. Es el cociente entre la presión parcial del vapor de agua a una temperatura t_o y la presión total del vapor a saturación y a la misma temperatura t_o. Equivale al porcentaje de humedad.

Temperatura seca. Temperatura del aire medida con un termómetro con el bulbo seco, es decir, en contacto directo con la atmósfera.

Temperatura húmeda. Es la temperatura de equilibrio dinámico alcanzado por una superficie húmeda cuando se la expone al aire. Puede medirse con termómetro cuyo bulbo está en ambiente de saturación, lo que se consigue envolviéndolo con un paño que se mantiene húmedo continuamente (bulbo húmedo).

Punto de rocío. Es la temperatura límite a la que el vapor de agua, existente en el aire o en el gas, se condensa pasando al estado líquido.

En los sólidos, la humedad puede venir expresada de varias formas:

Contenido de humedad. Expresado en tanto por ciento, es la cantidad de agua existente en las sustancias sólidas por unidad de peso o de volumen del sólido seco o húmedo. El término se aplica, con preferencia, en relación al sólido seco, es decir, viene expresado en base seca.

Contenido de humedad comercial. Contenido de humedad, expresado en kilogramos de agua por kilogramo del material, al salir éste del proceso de secado.

7.1.4.1 Humedad en aire y en gases

Pueden emplearse varios métodos en la determinación de la humedad en el aire y en los gases:

Método de elemento de cabello (o nylon). Se basa en la expansión o contracción lineal que son características de los materiales sensibles a las variaciones de humedad, tales como las fibras orgánicas (cabellos naturales) o las fibras sintéticas (nylon). El alargamiento de estos materiales es del 2,5% cuando la humedad relativa pasa del 0% al 100%. La exactitud es del ± 3% al ± 5% H.R. Por su poca robustez no se aplica en la industria.

En la figura 7.21 puede observarse el funcionamiento de estos instrumentos. Su exactitud es del orden del ± 3% al ± 5% y su campo de medida del 15% al 95% H. R.

Bulbo seco y bulbo húmedo (figura 7.22). Este instrumento se basa en la captación de la temperatura ambiente o seca y de la temperatura húmeda mediante dos termómetros, uno seco y otro con su bulbo constantemente humedecido.

Observando, en el diagrama psicométrico, las temperaturas del bulbo seco y del bulbo húmedo sobre las líneas correspondientes, se obtiene por intersección la humedad relativa.

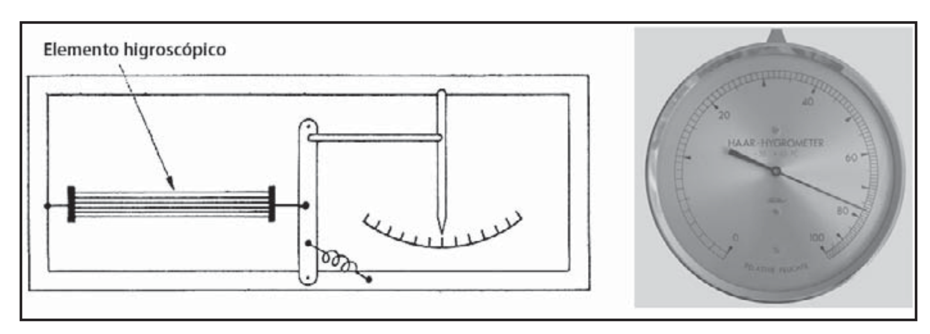


Figura 7.21 Elemento de cabello

En lugar de consultar el diagrama psicométrico para cada lectura, puede utilizarse un instrumento que mida directamente la temperatura diferencial entre los dos bulbos, seco y húmedo respectivamente, con lo que el índice, o la pluma de registro o la señal de transmisión, del instrumento indicará directamente la humedad relativa.

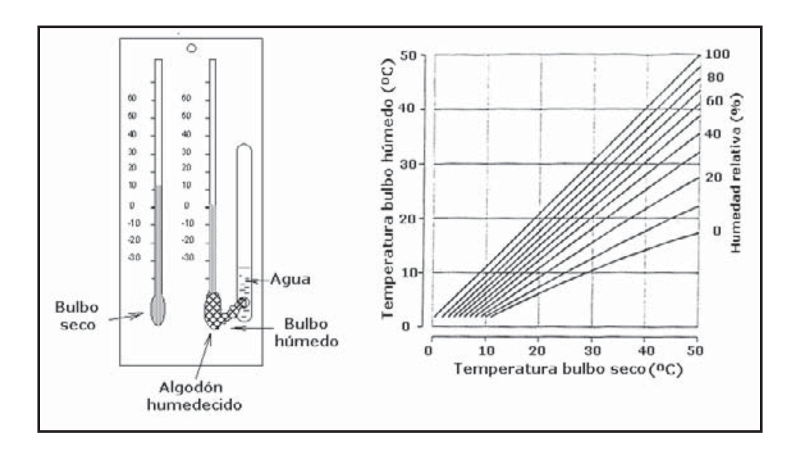


Figura 7.22 Bulbo seco y bulbo húmedo

El instrumento tiene una exactitud del ± 1% al ± 2% que mejora cuando la humedad relativa está próxima a la saturación, con lo que permite el uso de aparatos con un campo de medida muy estrecho a la H.R., próxima al 100%. A H.R. menor del 20%, su precisión es pobre. Por otro lado, su uso es desaconsejado en pequeñas cámaras, ya que el agua del bulbo húmedo se incorpora al ambiente y falsea la lectura.

Célula de cloruro de litio

La *célula de cloruro de litio* de medición de humedad relativa puede verse en la figura 7.23 y consiste en una célula embebida en cloruro de litio con una rejilla de láminas de oro. Al aplicar una tensión alterna a la rejilla, el tejido embebido en cloruro de litio se calienta y se establece un equilibrio entre la evaporación de agua del tejido y la absorción de agua del ambiente por parte del cloruro de litio. La sal tiene la propiedad de variar considerablemente de resistencia al aumentar o disminuir la humedad ambiente, ya que libera o absorbe iones de la película soporte. Como la humedad relativa viene determinada simultáneamente por el contenido de la humedad y por la temperatura del aire, es obvio que es necesario compensarla.

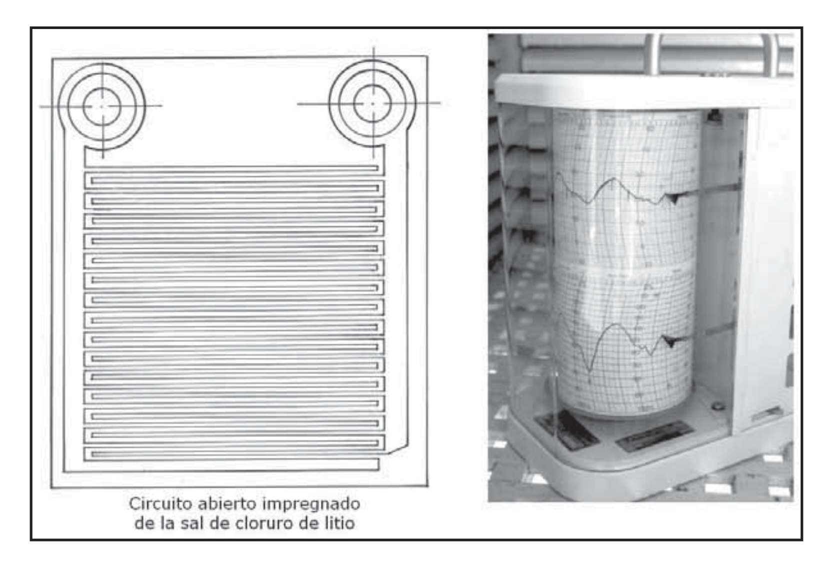


Figura 7.23 Célula de Cloruro de Litio

El elemento envejece, disminuyendo su indicación en torno al 1% al 2% por año. La exactitud suele ser del ± 2% al ± 3% de humedad relativa y el elemento puede medir del 5% al 95% de H. R. Su empleo, en la industria, ha ido disminuyendo por problemas de mantenimiento, ya que el elemento no puede utilizarse en atmósferas con mucho polvo, con dióxido de azufre, vapores ácidos, amoníaco, cloro, vapores alcalinos, acetileno, óxido de etileno y atmósferas contaminadas con sal.

Sensor polimérico

Este tipo de sensor de humedad relativa consiste en un condensador formado por un polímero termoestable, electrodos de platino y una base de silicio. En operación, el vapor de agua de la capa activa dieléctrica del condensador está en equilibrio con el ambiente donde se desea medir la humedad relativa. La capa de platino poroso actúa como blindaje de las influencias externas sobre la respuesta dieléctrica, mientras que la capa de polímero proporciona una protección mecánica sobre la capa de platino.

El *condensador polimérico* varía su constante dieléctrica según la humedad del ambiente, de modo que proporciona una respuesta a la humedad relativa dada por:

$$G = RT \times ln\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

en la que:

G = fuerza de absorción de humedad

R = constante de los gases perfectos

T = temperatura absoluta

P = presión parcial del vapor de agua

P_0 = presión de saturación del vapor de agua

Para compensar las variaciones de temperatura se coloca una resistencia Pt1000 en el sustrato del sensor cerámico.

La tensión de salida del sensor, a 25 °C, es:

$$V_{salida} = V_{alimentación} \times \left(0{,}0062 \times (\%RH) + 0{,}16\right)$$

Y la corrección por temperatura, en °C, es:

$$RH_{verdadera} = \frac{(\%RH)}{1{,}0546 - 0{,}00216 \times T}$$

El sensor puede trabajar con líquidos y vapores tales como isopropilo, benceno, tolueno, formaldehidos, aceites, agentes de limpieza y vapor de amoníaco.

La exactitud es del ± 5% si T < 10 °C, del ± 2% si 10 °C < T < 20 °C y del ± 1% si T > 20 °C.

El sensor incorpora un circuito de acondicionamiento de señal con una alimentación de 5 V, con lo que a 25 °C, la señal de salida de 0,8 V a 3,9 V corresponde a un cambio en la humedad relativa del 0% al 100%.

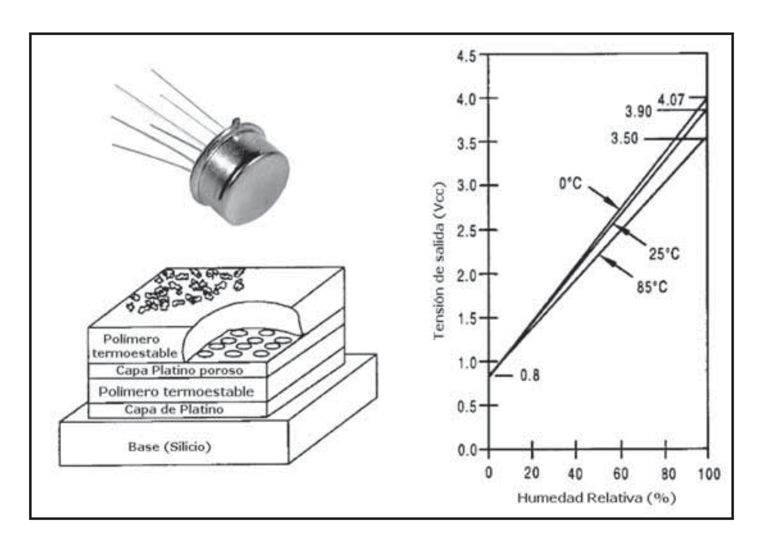


Figura 7.24 Sensor de condensador polimérico. Fuente: Honeywell

El mantenimiento del sensor se reduce a una verificación y limpieza periódicas con solución de detergente o alcohol isopropílico para eliminar los contaminantes que puedan depositarse en la vaina del sensor.

7.1.4.2 Humedad en sólidos

En la determinación de la humedad de los sólidos se emplean varios métodos.

Secado térmico

Es el método más antiguo; se emplea, normalmente, como comprobación de los demás sistemas. Consiste en aplicar calor al material en estado sólido, granular, fibroso e incluso en forma líquida hasta

que no puede liberarse más agua, a no ser que se aumente la temperatura. El agua se evapora mientras su presión de vapor dentro del material es mayor que la del aire del horno que le rodea; de este modo, pueden mejorarse las condiciones de secado trabajando a temperaturas altas y manteniendo baja la humedad dentro del horno (con sustancias absorbentes del agua o en hornos al vacío). La muestra del producto debe mantenerse un cierto tiempo a la temperatura de secado para llegar a un equilibrio de humedad en su interior, pudiendo variar este tiempo de 2 a 15 horas. Por diferencia de pesadas, antes y después de secar el material, se conoce la humedad del mismo.

El método de secado es fácil de realizar, pero tiene el inconveniente del excesivo tiempo que requiere y no distingue entre la humedad y las materias volátiles que el cuerpo puede contener o que puedan producirse por descomposición térmica. No obstante, el método correctamente realizado permite comprobar los demás sistemas de determinación de humedad.

Conductividad

Se basa en la medida de la conductividad de una muestra del producto al pasar una corriente a través de los electrodos en contacto con el mismo. Estos electrodos forman parte de un puente de Wheatstone con la indicación, el registro o el control de la humedad (figura 7.25).

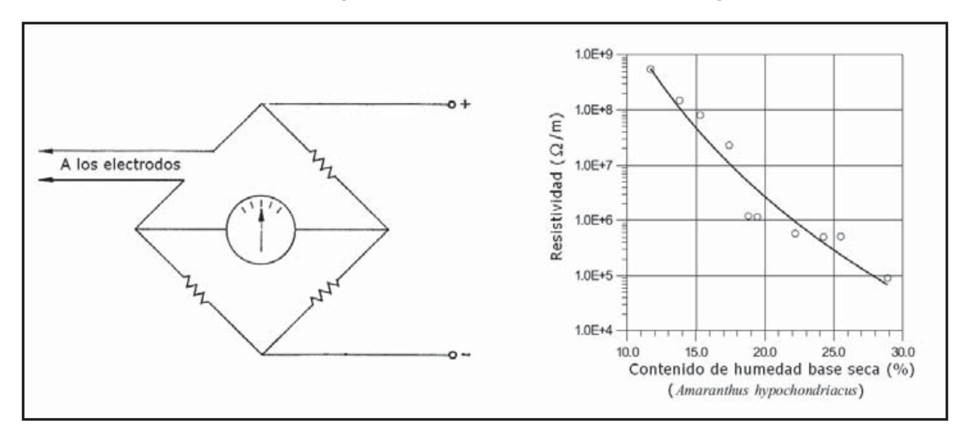


Figura 7.25 Método de conductividad. Fuente: Z. Hlaváèová - Int. Agrophysics, 2005

El método da buenos resultados y es repetitivo. Sin embargo, la lectura viene influida considerablemente por el estado de la superficie de contacto de los electrodos, por la presión de los mismos en el material, por la temperatura, etc., y, en particular, en los materiales de alta resistividad como el papel.

Capacidad

Se basa en la variación de la constante dieléctrica que el material experimenta entre el estado húmedo y el estado totalmente seco. Las moléculas de agua son de carácter bipolar y tienen una alta constante dieléctrica frente a los productos secos ($\varepsilon_r = 80$ frente a $\varepsilon_r = 6$). Por ejemplo, en el caso del papel, la variación puede estar entre 2,8 al salir del horno y 80, que es la constante dieléctrica del agua. Además, el valor de ε_r es linealmente proporcional a la humedad del sólido y a la capacidad del condensador. De este modo:

$$C = \varepsilon_r \times \varepsilon_0 \times k \times \frac{A}{d}$$

Y:

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \times \frac{pF}{m}$$

con:

ε_0 = constante dieléctrica del condensador sin el producto

d = separación de las placas del condensador

A = superficie de las placas

k = factor de forma (constante)

El material, cuya humedad se mide, es el dieléctrico situado entre las placas del condensador. Cuando el material toca o cierra el campo eléctrico de alta frecuencia, éste cambia y la señal de salida alimenta un puente de medida de capacidades (figura 7.26). La frecuencia de trabajo está comprendida entre 10 MHz y 1 GHz.

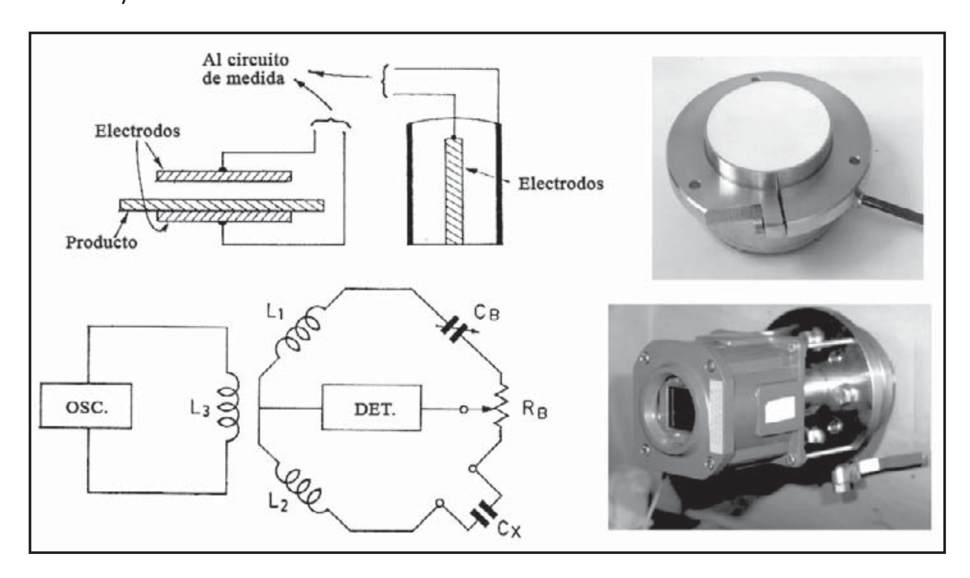


Figura 7.26 *Puente de capacidades para medida de humedad. Fuente: Liebherr-Mischtechnik GMBH*

El sistema se emplea en materiales con un contenido de humedad menor del 20% al 25%, y es independiente de la presión del contacto de los electrodos o de los cambios en la temperatura. La exactitud es del ± 0,1%.

Resonancia de microondas

Un circuito oscilante electromagnético, sintonizado a la frecuencia de resonancia del producto, orienta las moléculas de agua de éste hacia la polaridad del campo eléctrico, gracias a las moléculas de H_2 y O_2 que constituyen un dipolo. Al cambiar rápidamente de polaridad el campo, sólo las moléculas de agua vuelven a reorientarse, lo cual absorbe una energía que depende del número de moléculas de agua en el producto. Esta absorción de energía representa un factor de atenuación de la señal en la resonancia y da lugar a un desplazamiento de la frecuencia de resonancia.

El contenido de humedad de la muestra es:

$$Humedad = \frac{\dfrac{f_0 - f_1}{f_1}}{\dfrac{1}{Q_1} - \dfrac{1}{Q_2}}$$

con:

f_0 = frecuencia de resonancia del resonador en vacío

f_1 = frecuencia de resonancia con el producto

Q_1 = factor de calidad de la cavidad en vacío

Q_2 = factor de calidad de la cavidad con el material

El instrumento detector de humedad debe compensarse ante las variaciones de temperatura del producto y consta de los siguientes bloques:

- Sensor de microondas que genera una señal de microondas que transmite al material y que permite obtener una propiedad física (ε) del material para la determinación de la humedad.
- Transductor compuesto de un oscilador de microonda, un sistema de transmisión y un detector que convierte la señal de microonda, proporcional al contenido de humedad, en una señal eléctrica de baja frecuencia, como es el voltaje.
- Procesador de señal que compara el voltaje anterior con un voltaje estándar y da una señal de salida analógica o digital.
- Unidad de procesamiento de datos.

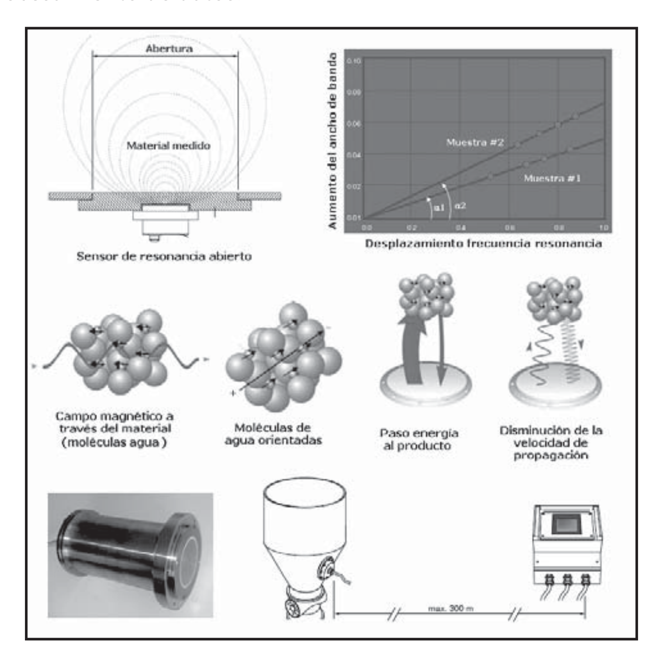


Figura 7.27 Haz de microondas a través del producto. Fuente: Doescher y Tews Electronik

En la figura puede verse la forma con que la medida se hace independiente de la densidad. Cada frecuencia de resonancia corresponde a una longitud de onda. Al cambiar la densidad del producto de una humedad constante se obtienen diferentes puntos unidos con una línea recta. El ángulo que forman dichas rectas con la horizontal es, pues, independiente de la densidad del producto. De este modo, el aparato se calibra asociando el ángulo con un valor de la humedad.

La determinación de la humedad es muy rápida, menos de un 1 segundo. La exactitud del sistema es del orden del ± 0,5% al ± 2%, hasta el 20% de humedad.

Método de infrarrojos

En el *método de infrarrojos* (figura 7.28), aplicado preferentemente en la fabricación del papel, una fuente de rayos infrarrojos emite un haz de rayos hacia la superficie del material cuya humedad desea medirse. La onda emitida está seleccionada de tal forma que el agua contenida en el producto absorbe la máxima radiación infrarroja mientras que la celulosa absorbe el mínimo.

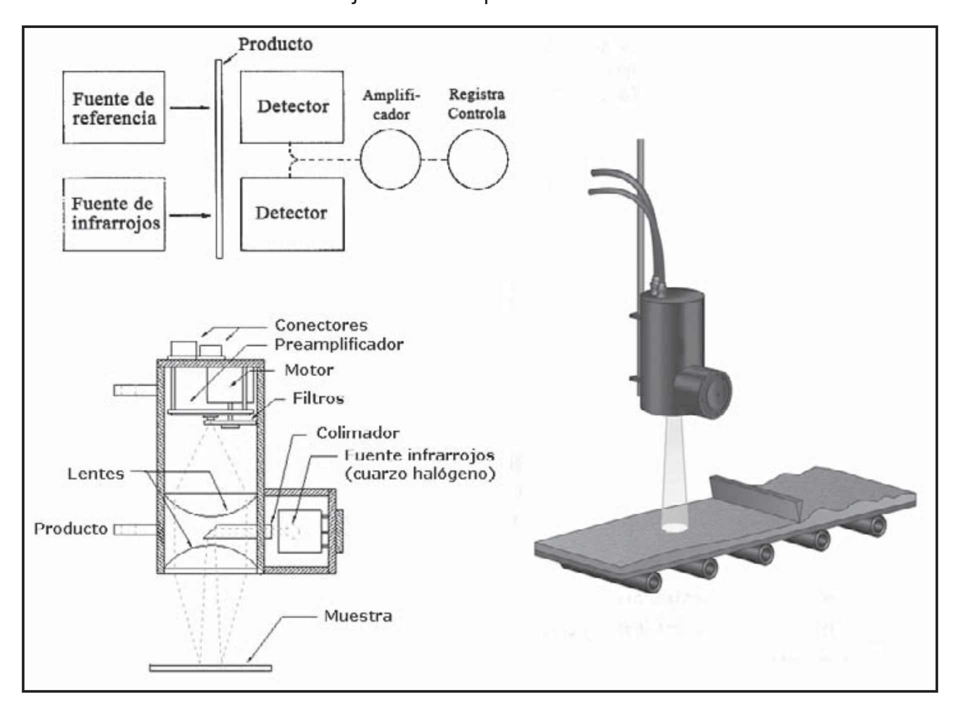


Figura 7.28 *Medida de humedad por infrarrojos. Fuente: Moisture Register Products*

De este modo, un detector capta la radiación que atraviesa el material e indica la humedad correspondiente. Para que la medida sea independiente de la capa de aire intercalada entre el emisor, el material y el detector, de las variaciones espesor del material y de su posición relativa entre el emisor y el detector, se acostumbra a utilizar otra fuente adicional que actúa como referencia. El conjunto emisor-detector suele ser móvil para explorar toda la banda de papel.

Método de radiación

En el *método de radiación* (figura 7.29), una fuente de neutrones de alta energía (americio/berilio) se dirige contra el material del proceso y parte de la radiación emitida es reflejada, principalmente,

por los átomos de hidrógeno existentes en las moléculas del material que retardan su velocidad. De este modo, se forma una nube de neutrones lentos alrededor de la fuente de neutrones rápidos y su concentración depende de la humedad del producto. El método es caro, requiere una supervisión de seguridad y una comprobación periódica de la fuente de neutrones. La exactitud es del ± 0,1%.

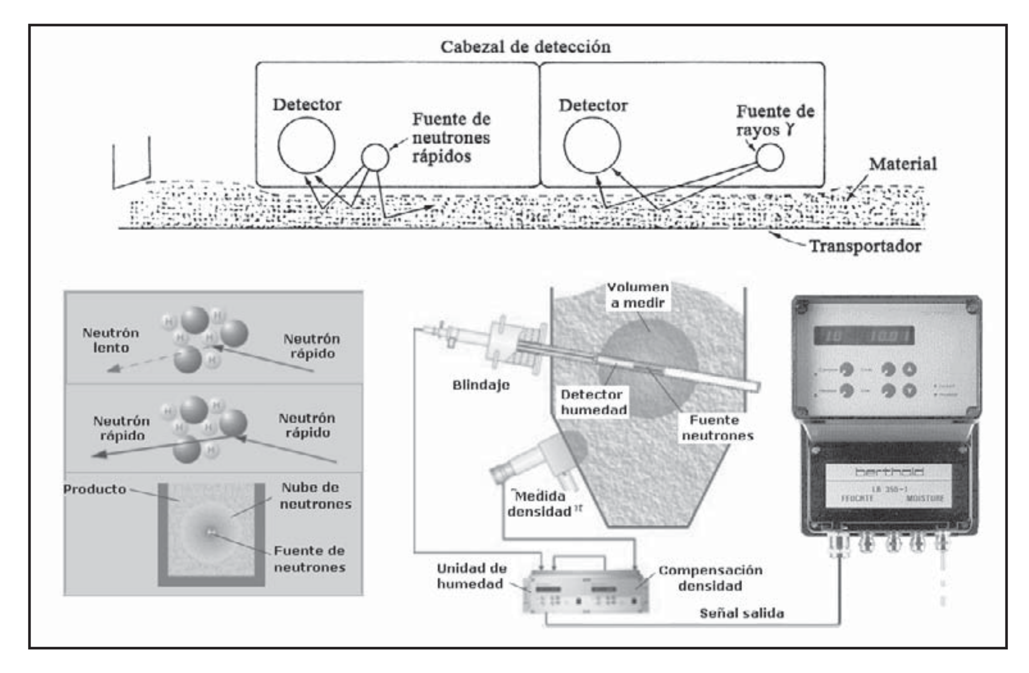


Figura 7.29 *Medida de humedad por radiación. Fuente: Berthold Technologies*

7.1.4.3 Punto de rocío

En la *medición del punto de rocío* se emplean la cámara de niebla, la célula de cloruro de litio, el sensor polimérico, el sistema de condensación en un espejo y el analizador de infrarrojos.

La *cámara de niebla* realiza una medida manual discontinua del punto de rocío. Consiste en un pequeña cámara con una bomba manual que permite comprimir una muestra del gas. El operador anota la presión y la temperatura iniciales del gas y lo comprime a una presión dada. A continuación, abre una válvula de escape a la atmósfera, con lo que el gas sufre una expansión adiabática y baja de temperatura. El ensayo se repite varias veces comprimiendo cada vez más el gas hasta que la temperatura alcanzada en la expansión hace aparecer niebla en la cámara. Esta temperatura corresponde al punto de rocío.

Sal saturada

La *célula de cloruro de litio* (figura 7.30) consiste en un manguito de tela impregnado con una solución de cloruro de litio, envolviendo una bobina. Sobre el manguito está arrollado un hilo bifilar, abierto en un extremo y alimentado a través del secundario de un transformador, con lo que circula una corriente entre los hilos a través de la sal de cloruro de litio. Ésta tiene la propiedad característica de mantenerse con una humedad relativa del 11% en equilibrio con la atmósfera húmeda. A valores inferiores al 11%, la sal cristaliza y deja de ser conductora.

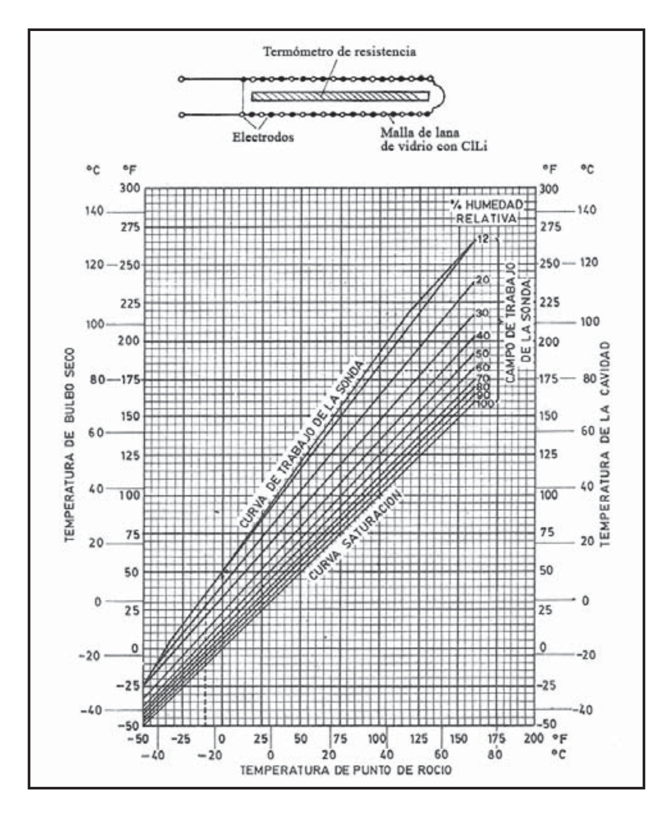


Figura 7.30 Célula de cloruro de litio

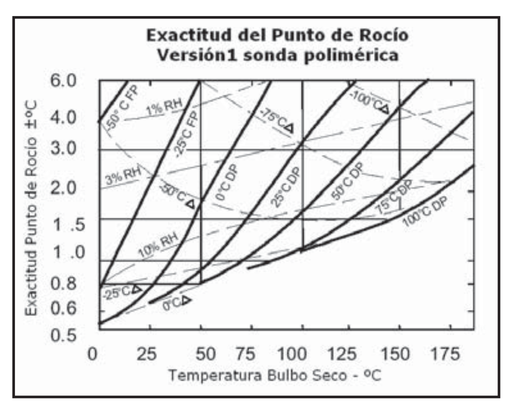
La sal es altamente higroscópica, por lo cual tiene una gran afinidad por la humedad ambiente; cuanto más alta sea ésta tanto más conductora será la sal y tanto más se calentará la bobina por la circulación de corriente a través del hilo bifilar. La temperatura de equilibrio de la bobina está, pues, relacionada con el punto de rocío del aire o del gas, de modo que puede medirse con una sonda de resistencia y un instrumento de puente de Wheatstone graduado, directamente, en temperatura del punto de rocío.

La célula es apta para temperaturas ambientes de -30 °C a 130 °C. A temperaturas superiores a 130 °C, el punto de rocío puede medirse admitiendo el paso de aire a una cámara de temperatura constante y enfriándolo a menos de 80 °C (180 °F) antes de circular a través de la célula.

La célula exige que los gases, cuyo punto de rocío se mida, no contengan ni amoníaco, ni dióxido de azufre, ni cloro, ni sal, ni partículas en suspensión. En caso de contaminación de la célula, es necesario regenerarla limpiándola y sumergiéndola en una solución de cloruro de litio. Su empleo ha ido disminuyendo debido a estos problemas de mantenimiento. El intervalo de medida es de -40 °C a 80 °C.

Sensor polimérico

El sensor polimérico utilizado en la medida de la humedad, permite también determinar el punto de rocío. En la memoria del instrumento se encuentran tablas de respuesta del sensor de humedad que permiten al microprocesador evaluar las señales digitales correspondientes a la temperatura y humedad del sensor y así determinar el punto de rocío de la atmósfera donde se encuentra el sensor.



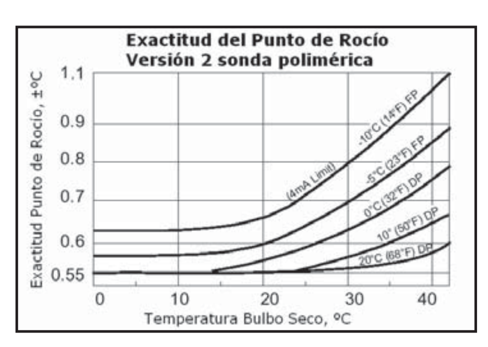


Figura 7.31 *Sensor polimérico de punto de rocío*

Intervalo de medida -40 °C a 80 °C. En la figura 7.31 puede verse la exactitud del instrumento para dos tipos de sondas.

Sensor de óxido de aluminio (Al_2O_3)

Se basa en la absorción o liberación de moléculas de agua, de una capa higroscópica de óxido de aluminio, en función de la presión de vapor de agua del ambiente. Esta capa higroscópica es el dieléctrico de un condensador, formado por un núcleo de aluminio y una capa externa porosa de oro.

Resolución de ± 0,1 °C.

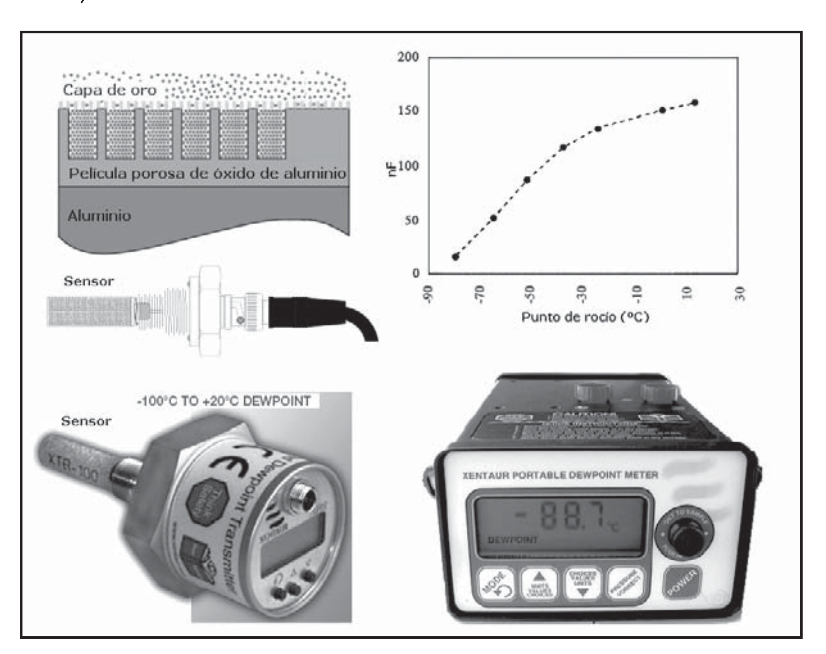


Figura 7.32 *Sensor de óxido de aluminio. Fuente Michell Instruments*

El *sensor cerámico* es una derivación del de óxido de aluminio. Consiste en una placa de cerámica plateada depositada en forma de vapor sobre una superficie que es muy sensible a los pequeños

cambios de la humedad del aire. El grueso del metal depositado es de 80 micras. Todos los datos de calibración están almacenados en la memoria del transmisor. El campo de medida es de -120 °C a + 30 °C y la exactitud de ± 1 °C a ± 2 °C.

El *sensor de óxido de silicio* también deriva del sensor de óxido de aluminio. Consiste en una base de silicio en cuya superficie se coloca una rejilla de electrodos en circuito abierto. La superficie se cubre con una capa de polímero, después una capa de metal poroso y, finalmente, una segunda capa protectora porosa de polímero. El sensor absorbe moléculas de agua, con lo cual cambia su capacitancia proporcionalmente a la humedad relativa del ambiente que le rodea. Un acondicionador de señal produce una frecuencia de salida compensada con la temperatura medida por una termoresistencia de platino. Cada sensor se calibra en múltiples puntos embebidos en la memoria del instrumento. La exactitud es de ± 1 °C a ± 2 °C.

Sistema de condensación en un espejo

Está representado en la figura 7.33 y consta de una cámara con un sistema calefactor y refrigerante que controla la temperatura de la superficie de un espejo miniatura situado en su interior y, a cuyo través, circula una corriente del gas cuyo punto de rocío hay que determinar. Inicialmente, el espejo es refrigerado mediante el efecto Peltier de un termopar hasta alcanzar el punto de rocío del gas, momento en el cual se empaña y una célula fotoeléctrica capta la reducción en la intensidad de luz reflejada. A partir de este punto, la temperatura de la superficie del espejo es controlada de manera que está en un estado de empañamiento, como equilibrio, entre la evaporación y la condensación. En estas condiciones, la temperatura del espejo, medida con una termoresistencia de platino, indica el punto de rocío del gas.

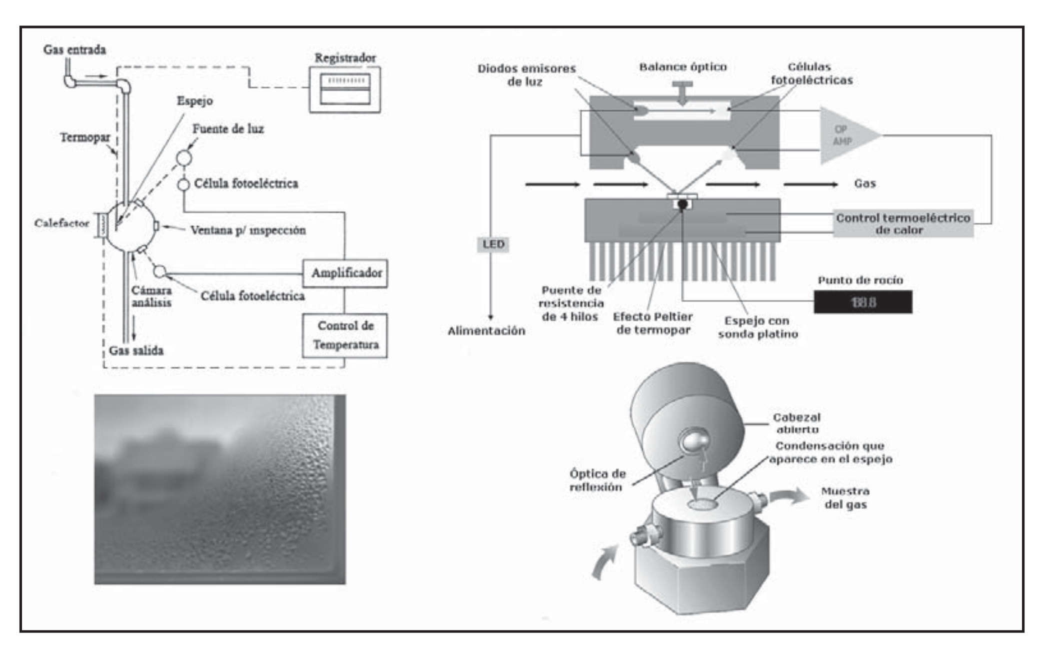
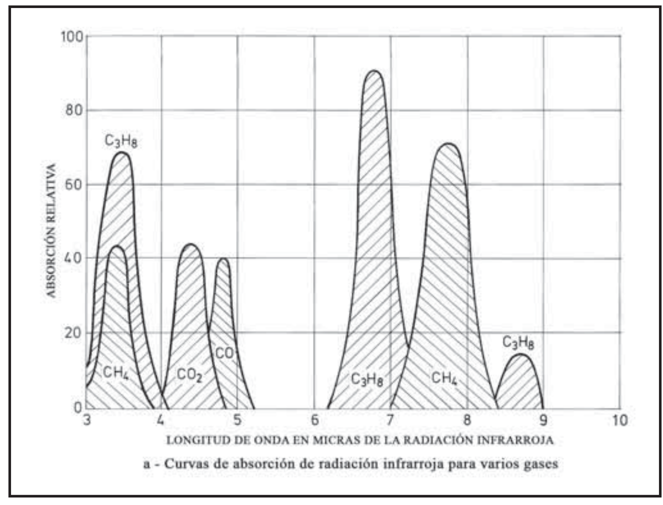


Figura 7.33 Sistema de condensación en un espejo

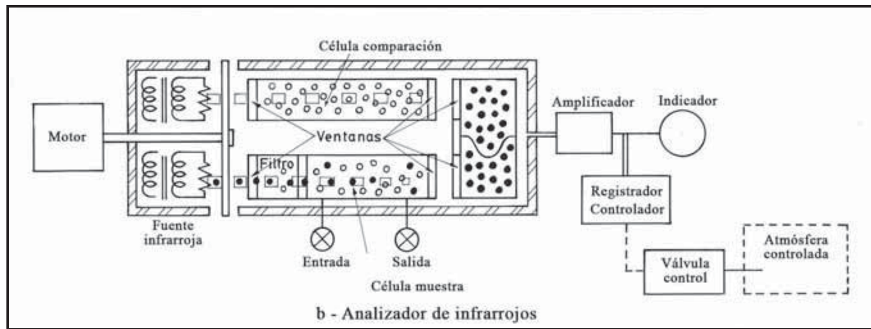
El instrumento tiene una exactitud total de ± 0,2 °C para los puntos de rocío comprendidos entre - 30 °C y 130 °C.

Analizador de infrarrojos

El analizador de infrarrojos, representado en la figura 7.34b, consiste en una fuente pulsante de infrarrojos (filamentos de Ni-Cromo), dos células, una de referencia y otra de muestra, a cuyo través pasan las radiaciones infrarrojas, y un detector.



a - Curvas de absorción de radiación infrarroja para varios gases



b - Analizador de infrarrojos

Figura 7.34 *Sistema de infrarrojos*

Si la cámara detectora está llena de vapor de agua, la radiación infrarroja es absorbida, proporcionalmente a la concentración de vapor de agua en la célula de gas muestra, con lo cual disminuye la presión en esta cámara como resultado de la energía intermedia absorbida. Si se bloquean las dos radiaciones, una la que pasa por la célula de referencia y la otra la que pasa a través de la célula de muestra del gas a analizar, no hay variación de presión en la cámara.

Si la célula de referencia contiene un gas no absorbente, tal como el nitrógeno, y por la célula muestra pasa el gas húmedo, la radiación a través del gas muestra, tal como se ha indicado, estará atenuada en la longitud de onda del vapor de agua en el gas, mientras que la radiación a través del gas patrón N_2 permanecerá invariable. Se obtiene así una presión variable pulsante en el detector; éste contiene dos cámaras separadas por un diafragma que actúa como un micrófono a condensador y convierte los impulsos de presión a una señal eléctrica que es amplificada, rectificada y, finalmente, registrada. El instrumento, además de medir el punto de rocío, puede determinar los porcentajes de varios componentes en el gas a analizar.

Los analizadores infrarrojos son de respuesta rápida, aptos para el registro de varias muestras de gas, pueden analizar atmósferas conteniendo amoníaco y con la ayuda de cilindros patrón son de fácil calibración.

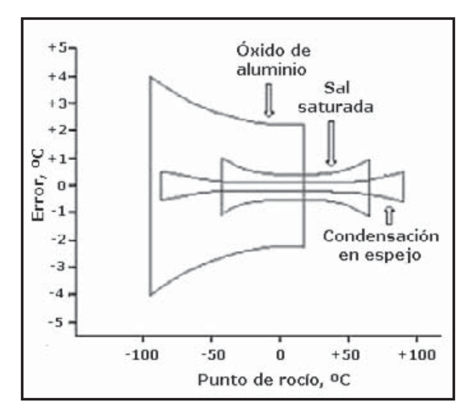


Figura 7.35 Comparación de errores en sistemas de medida de punto de rocío.
Fuente: Pieter R. Wiederhold, Wiederhold Associates

En la figura 7.35 puede verse una comparación de errores con los métodos de determinación del punto de rocío: óxido de aluminio, sal saturada y condensación en un espejo. Se observa que el mejor sistema es el de condensación y que los errores aumentan en las partes bajas y altas del campo de medida.

En la tabla 7.3 (página siguiente) figuran las características de los sistemas descritos de humedad y punto de rocío.

7.1.5 Viscosidad y consistencia

7.1.5.1 Introdución

La viscosidad y la consistencia son términos que se aplican a los fluidos y que representan la resistencia que ofrecen al flujo, o a la deformación, cuando están sometidos a un esfuerzo cortante.

La *viscosidad de un fluido*, definida por Newton, es la resistencia que ofrece el fluido al movimiento entre dos placas paralelas separadas por una distancia unidad, una de ellas fija y la otra móvil que se mueve con la unidad de velocidad. Esta resistencia se expresa como cociente entre el esfuerzo cortante por unidad de área (F/A) y la velocidad cortante por unidad de espesor de la capa de fluido (V/e).

La expresión es:

$$\mu = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{V}{e}}$$

Los fluidos newtonianos (agua, alcohol, aceite ligero de motor) se caracterizan por la relación lineal entre el esfuerzo cortante unitario y la velocidad cortante unitaria, es decir, la representación gráfica de F/A con relación a V/e es una línea recta.

Sistemas de medición de humedad y punto de rocío								
		Sistema	Campo de medida	Exactitud	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Humedad	Aire, gases y vapores	Cabello	15% al 95%	±3% - ±5%	Útil hasta el 70%	Poca robustez	Aire
		Bulbo seco y bulbo húmedo	20% al 100%	±1% - ±2%	Útil hasta 100ºC	Desaconsejado en pequeñas cámaras y con polvo y en gases determinados	Gases
		Cloruro de litio	5% a 95%	±2% - ±3%	Útil hasta el 70%	Envejecimiento	Gases excepto SO2, NH3, etc.
		Sensor polimérico	30% al 90%	±1% - ±5%	Líquidos y vapores. Fácil mantenimiento	–	Isopropilo, benceno, tolueno, formaldehidos, aceites, agentes de limpieza y vapor de amoníaco.
	Sólidos	Secado térmico	0 - 100%		Patrón	Lentitud. No apto control continuo	Método patrón en sólidos
		Conductividad	–	2% - 3%	Simple, repetitivo	Estado superficie	Sólidos
		Capacidad	0 - 25%	±0,1%	Independiente presión contacto o cambios temperatura	–	Sólidos
		Resonancia de microondas		±0,5% - ±2%	Determinación rápida < 1 seg. Medida independiente de la densidad	Max. Lectura 20% humedad	Sólidos
		Infrarrojos	0 - 100%	±1%	Sin contacto	Caro	Fabricación de papel
		Radiación	0 - 100%	±0,1%	Sin contacto	Caro, Inspección de seguridad	Papel, materiales granulares
Punto de rocio		Cámara de niebla		Método manual			Gases
		Sal saturada (cloruro de litio)	-40 ºC a 80 ºC	±1%	Barato	Lento. Envejecimiento. No apta para amoníaco, ni dióxido de azufre, ni cloro, ni sal, ni partículas en suspensión.	Gases, excepto amoníaco, ni dióxido de azufre, ni cloro, ni sal, ni partículas en suspensión
		Sensor polimérico	-40 ºC a 80 ºC	±0,5% - ±3%	Líquidos y vapores. Fácil mantenimiento	–	Isopropilo, benceno, tolueno, formaldehidos, aceites, agentes de limpieza y vapor de amoníaco.
		Óxido de aluminio (sensor cerámico y óxido de silicio)	-120 ºC a +30 ºC	±1 ºC - ±2 ºC	Líquidos y vapores. Fácil mantenimiento	–	Gases
		Condensación en un espejo	-30 ºC a +130 ºC	±0,2 ºC	Exactitud	Caro, gases limpios	Gases limpios
		Infrarrojos	0 - 30.000 ppm	±1%	Rápido	Caro	Gases

Tabla 7.3 *Sistemas de medición de humedad y punto de rocío*

Otros fluidos tienen pendientes variables y no siguen la definición de Newton (fluidos no newtonianos). Estos fluidos no newtonianos se clasifican en:

- *Tixotrópicos*. La viscosidad baja al aumentar el esfuerzo cortante (pinturas, champú).
- *Dilatantes*. La viscosidad aumenta cuando aumenta el esfuerzo cortante (mezclas de arena y agua).

- *Plásticos y pseudoplásticos*. Se comportan como un sólido hasta un cierto límite del esfuerzo cortante y después se convierten en un fluido newtoniano o no newtoniano.

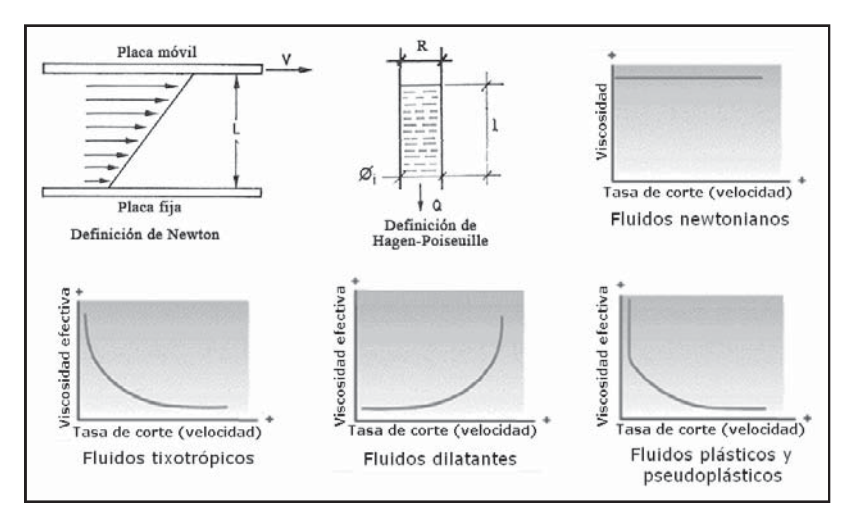


Figura 7.36 Definición de viscosidad y tipos de fluidos

Muchos plásticos requieren la aplicación de una cierta fuerza a la placa móvil antes de que ésta se mueva y, una vez en movimiento, la viscosidad aparente disminuye al incrementarse la velocidad de la placa (la pendiente baja). Otros materiales, que en reposo están coagulados, pasan al estado líquido al ser agitados (tixotrópicos).

Hagen-Poiseuille definieron la viscosidad en términos más prácticos expresando la relación entre los esfuerzos y las velocidades cortantes para un tubo capilar de la forma siguiente:

$$\mu = \frac{\frac{\Delta P}{2\times l}}{\frac{4\times Q}{\pi \times R^4}} = \frac{\pi \times \Delta P \times R^4}{8\times Q\times L}$$

en la que:

ΔP = presión diferencial a través del líquido en el tubo capilar

R = radio interior del tubo

Q = caudal del fluido

l = longitud del tubo

Los términos relacionados con la viscosidad son:

Viscosidad dinámica o absoluta definida por la fórmula de Hagen-Poiseuile, cuya unidad en el sistema de unidades internacionales SI es el Pa × s, o el mPa × s (1 Pa × s = 1000 mPa × s), unidad que ha sustituido en el sistema CGS al poise (1 dina × s/cm^2) y al centipoise (cp), equivalente a 0,01 poise (1 mPA × s = 1 centipoise).

El agua a 20 °C tiene una viscosidad de 1 centipoise. Algunos valores de viscosidad son los que aparecen en la tabla 7.4 (página siguiente).

Viscosidades a 20ºC en centipoises (cP)			
aire	0.02	aceite de motor SAE 20	125
acetona	0.3	aceite de motor SAE 50	540
metanol	0.6	aceite de ricino	986
agua	1.0	glicerina	1490
etanol	1.2	jarabe de crepes	2500
mercurio	1.5	jarabe de arce	3200
aceite vegetal	28	melazas	20
aceite de trigo	72	mantequilla	250
aceite de oliva	84	masilla de ventanas	100.000.000

Tabla 7.4 Viscosidades típicas de algunas sustancias a 20 ºC (centipoises)

Viscosidad cinemática, que es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido. Su unidad en el sistema internacional (SI) es el m^2/S, y en el CGS el cm^2/s, llamado stoke, y para valores pequeños se emplea el centistoke (cs) igual a 0,01 stoke (1 m^2/s = 10.000 stokes).

Si la viscosidad se expresa en función del tiempo que un volumen determinado del fluido emplea para pasar a través de un orificio o de un tubo capilar (viscosímetro figura 7.37a) se utilizan las siguientes unidades:

- Escala *Saybolt* (Estados Unidos) = Tiempo, en segundos, que tardan 60 ml del fluido en pasar a través del orifico calibrado de un viscosímetro universal Saybolt a una temperatura determinada.
- *Redwood* (Gran Bretaña) = Tiempo, en segundos, que tardan 50 ml de aceite en pasar a través del orifico calibrado de un viscosímetro universal Redwood a una temperatura determinada.
- *Engler* (Europa) = Relación entre el tiempo, en segundos, que tardan 200 ml del fluido y 200 ml de agua en pasar a la misma temperatura por un viscosímetro Engler normalizado. Expresado en grados Engler.

Existe una relación entre la viscosidad cinemática (ν) y las unidades anteriores, dada por la fórmula:

$$\nu = A \times t - \frac{B}{t}$$

con los valores de A y B dados por la tabla siguiente:

Viscosímetro	**A**	**B**
Saybolt	0,0022	1,8
Redwood	0,0026	1,72
Engler	0,00147	3,74

En la tabla 7.5 se muestran algunas equivalencias entre estos tres sistemas de viscosidad cinemática.

La *consistencia* es el grado de deformación que presentan los fluidos cuando se les somete a un esfuerzo cortante. El término representa, esencialmente, la viscosidad de suspensiones de partículas insolubles en un líquido y es una característica de fluidez del mismo.

El término consistencia se aplica, en la industria, en la fabricación de pinturas, de papel, en el envase de productos alimenticios, etc.

Viscosidad cinemática a 100 ºC (Centistokes)	Saybolt Universal (segundos)	Redwood (segundos)	Engler (grados)
1,8	32	30,8	1,14
2,7	35	32,2	1,18
4,2	40	36,2	1,32
5,8	45	40,6	1,46
7,4	50	44,9	1,6
8,9	55	49,1	1,75
10,3	60	53,5	1,88

Tabla 7.5 Equivalencias entre Saybolt, Redwood y Engler

Las unidades de consistencia son totalmente distintas de las de viscosidad y se expresan en unidades arbitrarias. Por ejemplo, en la industria papelera, la consistencia designa la proporción entre el peso de materia seca o fibra de pulpa seca y el peso total de los sólidos más el agua que los transporta. Así:

$$Consistencia\ (\%) = \frac{Peso\ \ solidos\ \ sec\,os\ \ en\ \ Kg}{Peso\ solidos\ sec\,os + agua\ en\ kg} \times 100$$

La consistencia podrá detectarse, de acuerdo con la definición dada, presionando sobre la pulpa de papel con una cuchilla especialmente diseñada para eliminar el rozamiento y la fuerza de impacto.

7.1.5.2 Viscosímetros

En la industria, se emplean los siguientes sistemas para la medida de viscosidad.

Viscosímetros *discontinuos* que se basan en:

a) Medir el *tiempo que emplea un volumen dado del fluido para descargar a través de un orificio* (figúra 7.37a). El orificio puede sustituirse por un tubo capilar.
b) *Tiempo de caída de una bola* metálica o de ascensión de una burbuja de aire en el seno del fluido contenido en un tubo o bien de caída de un pistón en un cilindro (figura 7.37b).
c) *Par de resistencia* de un elemento estacionario en una taza rotativa que gira a velocidad constante. El par se mide por el desplazamiento angular de un resorte calibrado unido al elemento fijo (figura 7.37c).

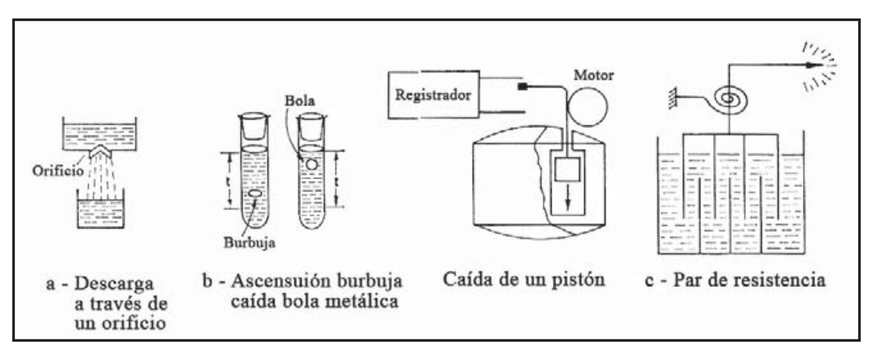


Figura 7.37 Métodos discontinuos de medida de viscosidad

Entre los viscosímetros *continuos* que permiten el control de la viscosidad se encuentran los siguientes:

1. *Caída de presión producida por un tubo capilar* al paso del fluido que se bombea a caudal constante (figura 7.38a). Dos tomas, situadas antes y después del tubo capilar, se conectan a un transmisor de presión diferencial neumático o electrónico o digital.
2. Rotámetro con *flotador sensible a la viscosidad* (figura 7.38b). Se mantiene un caudal constante del fluido, con lo que la posición del flotador depende de la viscosidad. Al rotámetro se le puede acoplar un transmisor neumático, electrónico o digital.

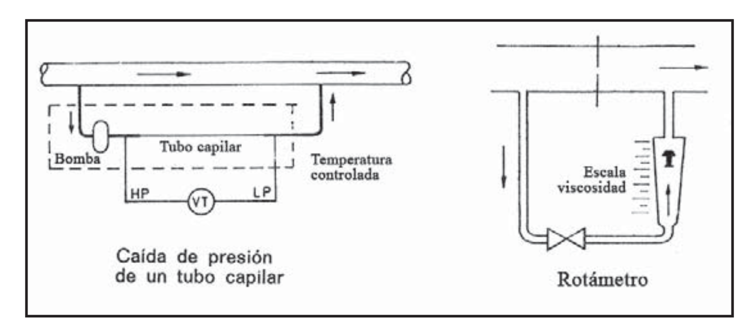


Figura 7.38 Viscosímetros continuos de caída de presión y rotámetro

3. *Rotacionales*. Miden el par de torsión necesario para hacer girar un elemento en el fluido. El fluido está contenido entre dos cilindros, uno fijo (radio R_a) y otro giratorio (radio R_i) de longitud L, de modo que es dividido en múltiples capas con velocidad angular diferente, desde 0 a ω. El movimiento relativo de las capas indica la Tasa cortante (*Shear rate* D) y la Tensión cortante (*Shear stress* τ).

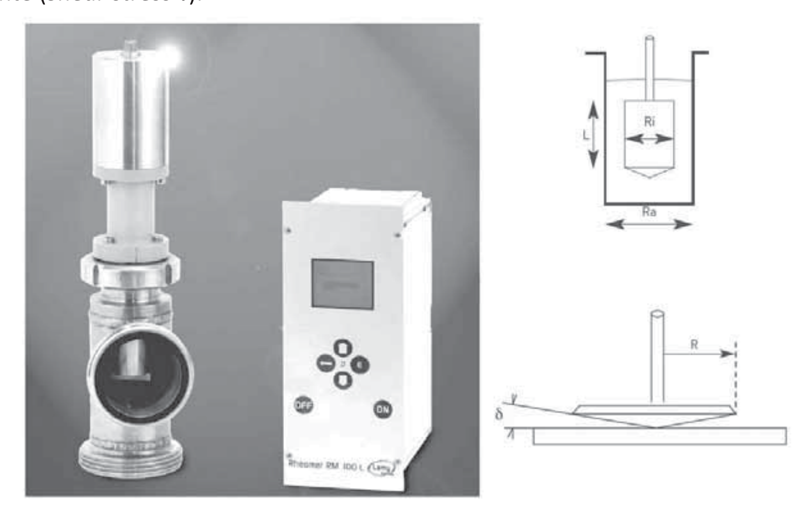


Figura 7.39 Viscosimetro rotacional. Fuente: Lamy Rheology

La velocidad de giro es seleccionada (ω), el par de rotación resistente (M) se mide y así se verifica:

Considerando:

$$\delta = \frac{R_a}{R_i}$$

Resulta:

$$Tensión\ cortante\ (\tau) = \frac{1+\delta^2}{2\delta^2} \times \frac{M}{2\pi \times L \times R_i^2}$$

$$Tasa\ cortante\ (D) = \omega \times \frac{1+\delta^2}{\delta^2 - 1}$$

Si el elemento rotativo es una placa cónica, se tiene:

$$Tensión\ cortante\ (\tau) = \frac{3M}{2\pi \times R^3}$$

$$Tasa\ cortante\ (D) = \frac{\omega}{arc\ \delta}$$

En la norma DIN ISO 3219:1993 se indica la forma de determinar la viscosidad utilizando un viscosímetro rotacional. La velocidad de rotación es de 25 a 600 rpm. El campo de medida es de 10 a 150.000 mPas. El par de torsión abarca de 0,05 a 30 mNm.

4. *Vibraciones*. La frecuencia de resonancia de una horquilla o de un cilindro en el seno del fluido indica la densidad, mientras que la amplitud de la vibración es inversamente proporcional a la viscosidad. El sistema electrónico asociado mantiene la vibración en la frecuencia de resonancia. La temperatura del fluido abarca desde -40 °C a +150 °C.

Figura 7.40 Viscosímetro de vibración

El campo de medida es de 0,3 a 10.000 cP.

7.1.5.3 Medidores de consistencia

La consistencia se define como el porcentaje de peso de material seco fibroso en cualquier combinación de agua y pulpa. Se calcula con la fórmula:

$$Consistencia\ (\%) = \frac{Peso\ total\ de\ material\ fibroso\ seco}{Peso\ total\ de\ pulpa\ o\ lechada}$$

La *consistencia* se mide en la industria de las formas siguientes:

Medida de la *distancia que recorre el fluido* sobre una regla graduada y en un tiempo determinado. En la figura 7.41a puede verse este sistema.

Medidor de consistencia de *disco rotativo* o de *paletas rotativas* (figura 7.41b) que mide el par de torsión necesario para hacer girar, a velocidad constante, un disco o un cono con perfiles caracterizados dentro del fluido. Margen: 1,5% al 18%. Repetibilidad: ± 0,01% Cs.

En el *medidor de paleta* (figura 7.41c), una paleta de forma especial situada en el seno del fluido mide el esfuerzo cortante, no siendo influida por las fuerzas de impacto ni por las de rozamiento gracias a su forma geométrico. Un transmisor electrónico o digital envía la señal correspondiente al valor de la consistencia. Margen: 0,7% al 16%. Exactitud: ± 1%.

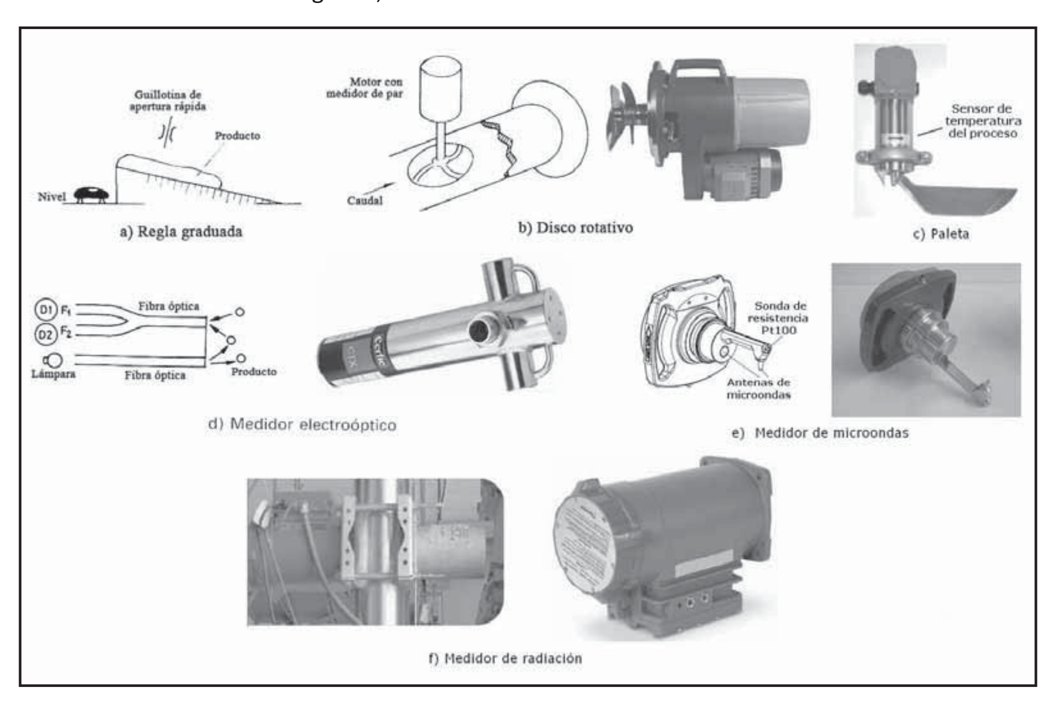


Figura 7.41 Medidores de consistencia. Fuente: Berthold Industrial Systems

El medidor *electroóptico* (figura 7.41d) se basa en la captación de la luz reflejada de una mezcla de pulpa de papel y agua. Dos detectores, *D1* y *D2*, captan esta luz reflejada a través de fibra óptica y de dos filtros F_1 y F_2, de tal modo que, en uno de ellos, el agua del fluido absorbe la luz mientras que en el otro no interviene prácticamente. Así, el cociente de las dos señales es una función de la cantidad de agua existente entre las partículas del producto, es decir, de la consistencia de la pulpa.

El margen de medida es de 0,2% al 6%.

El *medidor de consistencia por microondas* (figura 7.41e) se basa en las propiedades dieléctricas del producto, fundamentalmente agua y materia sólida, con diferentes constantes dieléctricas. Existe una relación lineal entre el tiempo de propagación de las microondas, es decir, la velocidad y la consistencia.

$$v = \frac{c}{\sqrt{e_r}}$$

siendo:

v = velocidad

c = velocidad de la luz en el vacío

e_r = constante dieléctrica del medio

Como las microondas avanzan menos en el agua que en las fibras, el tiempo que emplean las microondas en atravesar la masa es función de la consistencia de la masa. El intervalo de medida es del 0% al 16%. La exactitud es del ± 0,02%.

El *medidor de consistencia por radiación* (figura 7.41f) dispone de una fuente de rayos gamma, cuya radiación es atenuada al atravesar la pasta. Esta atenuación es proporcional a los cambios en la consistencia a igualdad de distancias entre la fuente y el producto. La exactitud es del ± 0,01% y la repetibilidad es del ± 0,0001%.

En la tabla 7.6 (página siguiente) se encuentra un resumen de características de los instrumentos medidores de viscosidad y consistencia.

7.1.6 Llama

La detección de la llama es muy importante desde el punto de vista de seguridad. Los quemadores de gas o fuel-oil, utilizados en los hornos o en las calderas de vapor, necesitan, para que su funcionamiento sea correcto, que la llama producida por el combustible sea estable, de calidad y que se mantenga en estas condiciones mientras el quemador esté en marcha. Ante un fallo en la llama, el sistema de protección debe actuar, inmediatamente, excitando el circuito eléctrico de enclavamiento previsto en la instalación para que el conjunto "caiga" en seguridad y evite la entrada de combustible sin quemar, eliminando así el peligro de su eventual encendido y explosión subsiguiente.

Los detectores de llama aprovechan varias características de la llama para su funcionamiento: calor, ionización y radiación.

7.1.6.1 Detectores de calor

El calor lo utilizan los *detectores térmicos* (figura 7.43) formados por bimetales, termopares, varillas de dilatación y dispositivos a expansión de líquidos que proporcionan un control relativamente satisfactorio en instalaciones domésticas.

7.1.6.2 Detectores de ionización – rectificación

La ionización es el fundamento de los *detectores de ionización-rectificación* (figura 7.43). Una tensión alterna, aplicada a dos electrodos colocados dentro de la llama, hace circular una pequeña corriente

alterna, ya que los gases en la llama están ionizados. La resistencia de la llama es bastante alta, del orden de 250.000 a 150 millones de ohmios, y la corriente que pasa es de unos pocos microamperios. Estos detectores de conductividad tienen el inconveniente de que un cortocircuito de alta resistencia entre los electrodos simula la llama.

		Sistema	Campo de medida	Exactitud	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Viscosidad	Discontinuo	Tiempo de descarga de un fluido a través de un orificio	Hasta 20.000 cp	± 0,1%	Laboratorio	Discontinuo	Pinturas y barnices, Laboratorio
		Tiempo de caída de una bola o de ascensión de una burbuja	Hasta 200.000 cp	Alta	Laboratorio	Discontinuo	Aceites de alta viscosidad, Laboratorio
		Par de resistencia en una taza	Amplio	_	_	Discontinuo	General
	Continuo	Presión diferencial en un tubo capilar	Hasta 3.000 cp	± 2%	Continuo		General
		Rotámetro con flotador	3 a 30.000 cp	± 2% al ± 4%	Continuo	_	Fuel-oil
		Rotacionales	10 a 150.000 mPas				
		Vibraciones	0,3 a 10.000 cp				
Consistencia		Distancia recorrido de una pendiente en un tiempo determinado	Amplio	± 0,1%	Simple	Laboratorio	Industria alimenticia, Laboratorio
		Disco rotativo o paleta rotativa	1,5% al 18%	± 1%	_	Desgaste por abrasión	Industria papelera
		Paleta	0,7% al 16%	± 1%	Continuo	Materiales especiales Mantenimiento y calibración	Industria papelera
		Electroóptico	0,2% al 6%	± 0,1%	Muy exacto. Pequeñas tuberías con un caudal mínimo. Insensible al color o a la luminosidad	Recubrimiento de producto y frecuentes calibraciones	Papel
		Microondas	0% a 16% Cs	0,02%	Independiente del grado o del tipo de madera	Coste alto. Límite de uso por presión, conductividad y pH del proceso	Pulpa y Lechada
		Radiación	0% a 15%	± 0,01%	No intrusivo	Coste alto. Inspecciones de seguridad	Pulpa y Lechada

Tabla 7.6 Medidores de viscosidad y consistencia

Los *detectores de llama de rectificación* se basan en que al aplicar una tensión alterna a los electrodos (varilla y quemador), la corriente circula con mayor facilidad en un sentido que otro si la superficie activa de uno de los electrodos (superficie expuesta a la llama) es varias veces mayor que la del otro electrodo (4:1). De este modo, se obtiene una corriente alterna rectificada, parecida a una corriente continua pulsante, con lo cual, si se presenta un cortocircuito de alta resistencia en los electrodos, se genera una señal alterna que es detectada como falsa por el circuito electrónico. Tienen el inconveniente de que no pueden usarse satisfactoriamente en quemadores de fuel-oil, ya que la llama del fuel quema en despegue del inyector del quemador, y, además, se forman sedimentos e incluso corrosiones en la varilla por la combustión de fuel-oil.

7.1.6.3 Detectores de radiación

Los detectores basados en la radiación se fundan en la energía que una llama irradia en forma de ondas que producen luz y calor. En el gráfico de la figura 7.42 pueden verse las radiaciones visible

(10% de la total), infrarrojos (90% de la total) y ultravioleta (1% de la total), así como las propias de la llama de fuel-oil, de gas y del refractario.

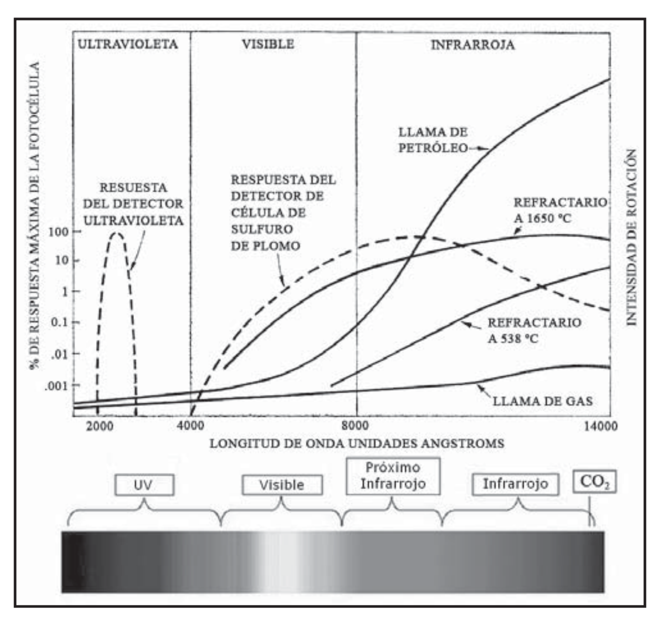


Figura 7.42 *Gráfico de radiación de la llama*

Los detectores disponibles pueden clasificarse como sigue:

a) Los detectores de *radiación visible* (figura 7.43) son de dos tipos: sulfuro de cadmio y óxido de cesio. El primero, que es el más utilizado, consiste en un elemento de sulfuro de cadmio que varía su resistencia de forma inversamente proporcional a la intensidad luminosa, mientras que el segundo consiste en un tubo de vacío que contiene un cátodo y ánodo emitiendo electrones cuando la luz incide sobre su superficie. La aplicación de estos detectores requiere una llama luminosa quedando su uso limitado a quemadores de combustibles líquidos. Son incapaces de diferenciar la luz procedente de una llama de la de otras fuentes (luz natural, refractario, etc.).

b) Los detectores de *radiación infrarroja* (figura 7.43) emplean la célula de sulfuro de plomo cuya resistencia eléctrica decrece al aumentar la intensidad de radiación. La célula de sulfuro de plomo no distingue entre la radiación infrarroja emitida por el refractario o por la llama. Sin embargo, la emisión de energía radiante de la llama tiene una característica parpadeante que permite, a un circuito electrónico especialmente concebido, discriminar entre la señal de llama y la señal uniforme del refractario. No obstante, el movimiento de los gases calientes frente al refractario puede simular este parpadeo, excitando a la célula.

c) Los detectores de *radiación ultravioleta* (figura 7.43) consisten en un tubo que contiene dos electrodos, normalmente de tungsteno. El tubo es de material permeable a la radiación ultravioleta, cuarzo por ejemplo, y está lleno de un gas inerte. El funcionamiento es similar al de un tubo Geiger.

Si una radiación ultravioleta penetra en el tubo e incide sobre el cátodo, éste emite electrones que son atraídos por el ánodo a causa del campo eléctrico establecido entre ambos. Este proceso ioniza el gas en el tubo, con lo que éste conduce una corriente.

Para asegurar una verificación constante de la presencia de llama es preciso interrumpir, periódicamente, la tensión entre cátodo y ánodo, con el fin de que se establezca la conductividad del tubo un número de veces por segundo, dado que dicho tubo presenta, una vez excitado, una descarga automantenida en tanto que exista un campo eléctrico entre los electrodos.

La ventaja principal de los detectores de radiación ultravioleta es su total insensibilidad a las radiaciones infrarrojas y visibles no siendo afectados, por este motivo, por las radiaciones del refractario caliente. Dado que ambas llamas de gas y de fuel-oil generan radiaciones ultravioletas, estos detectores son idóneos para instalaciones mixtas.

En la figura 7.43 pueden verse los distintos tipos de detectores de llama.

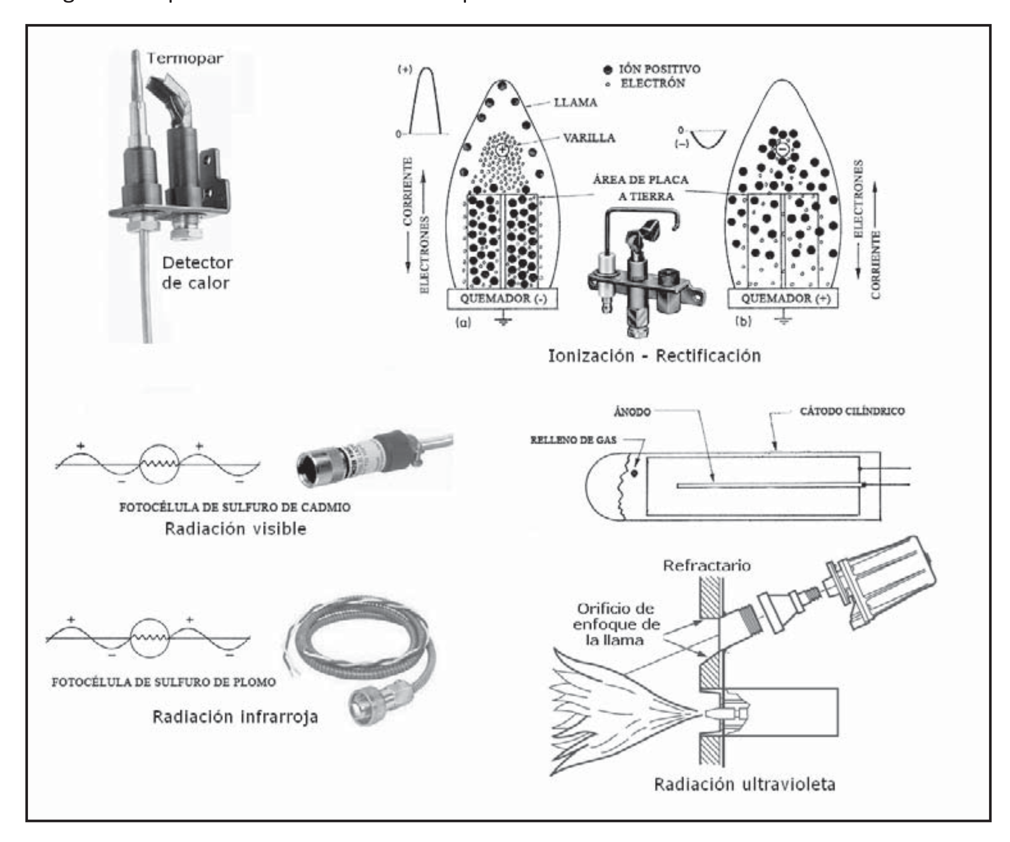


Figura 7.43 Tipos de detectores de llama

En la tabla 7.7 (página siguiente) se indica una comparación de los sistemas de seguridad de llama.

7.1.6.4 Programadores

Los detectores descritos están conectados a *programadores* que pueden abarcar desde la simple alarma de fallo de llama hasta una programación completa de puesta en marcha y paro de la instalación incluyendo las fases de prepurga (para limpiar totalmente la cámara de combustión antes de cada encendido), supervisión de llama piloto y principal, postpurga, interruptores de enclavamiento para fallos en la presión de vapor de atomización, presión de aire de control, alimentación eléctrica, nivel bajo en la caldera, ventilador de aire forzado, etc. (figura 7.44).

Detector		Funcionamiento	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Calor		Detector térmico de bimetal, termopar, etc.	Simple	Retardo en la detección de la llama	Domésticas, edificios de viviendas y hoteles
Rectificación		Ionización de la llama y rectificación de la corriente obtenida entre dos electrodos	Simple	Sedimentos y corrosiones en el electrodo en llama de fuel-oil	Domésticas, edificios de viviendas y hoteles
Radiación	Visible	Radiación 0,4 a 0,7 µm. Análisis de pixeles con algoritmos sofisticados	Capaz de enfocar un plano de la llama. Puede blindarse contra humo o niebla.	Refractario caliente puede simular la llama. Insensible a la llama de gas con alta concentración de aire.	Llamas luminosas
	Infrarroja	Radiación 0,7 µm y mayor. Frecuencia típica 4,3 µm	Capaz de enfocar un plano de la llama. Un circuito electrónico compensa el parpadeo de la llama con relación al refractario caliente.	Corriente haces calientes en refractario puede simular la llama	Industriales
	Ultravioleta	Radiación 185 a 260 nm	Poco afectado < por radiación cósmica y la luz del sol	Aceite y grasa en la ventanilla bloquean el detector. Falsas alarmas por lámparas de halógeno y cuarzo, sin vidrio de protección. Falsas alarmas por arcos de soldadura y arcos estáticos.	Industriales. Cualquier tipo de llama

Tabla 7.7 *Características comparativas de detectores de llama*

El sistema detector-programador debe ser capaz de detectar la llama en un tiempo lo más breve posible. Como ejemplo, señalemos que en los detectores de llama de tipo térmico el tiempo de respuesta es del orden de 1 a 3 minutos. En un quemador de gas de una potencia de 600.000 kcal/h con un consumo aproximado de 60 m^3/h de gas natural, y ante un fallo de llama el detector térmico, necesitaría 1 minuto para cortar el paso de combustible y durante este tiempo habrían entrado, en la cámara de combustión, 1 m^3 de gas y una cantidad de aire diez veces superior, totalizando 11 m^3 de mezcla explosiva potencial. En cambio, un sistema electrónico hubiera actuado en un tiempo aproximado de un segundo, siendo el volumen liberado, en este caso, de sólo 0,2 m^3. Asimismo, el sistema debe disponer de una autocomprobación de sus componentes en cada arranque.

A primera vista parece lógico pensar que, en una instalación dada, pueden presentarse gran número de explosiones. De hecho no es así, dado que para que se produzca una explosión deben aparecer fallos sincronizados. Es decir, el fallo simultáneo de un componente y el de la llama o de la ignición deben ocurrir dentro del mismo ciclo.

La posibilidad de que concurran estas circunstancias en un mismo ciclo es remota. Sin embargo, a medida que el número de ciclos operativos disminuye, la posibilidad de un doble fallo aumenta, ya que el tiempo entre puestas en marcha y, por tanto, entre verificaciones de componentes, es mayor, tal como sucede en navegación o en industrias que sólo paran un número limitado de veces al año.

En estas condiciones, la protección total se logra con una autocomprobación periódica de sus componentes durante la marcha de la caldera. Si se presenta una simulación de fallo de llama, el dispositivo de autocomprobación impedirá el arranque del quemador o bien, si dispone de autocomprobación periódica, lo parará si estaba en marcha.

La autocomprobación periódica durante la marcha se logra con un detector ultravioleta dotado de un sistema de comprobación electrónica de la presencia de llama. Otro sistema consiste en un diafragma oscilante que dispara unas 50-90 veces por minuto de acuerdo con los impulsos emitidos por un relé en el programador.

De este modo, la llama deja de ser vista por el detector y el relé de impulsos asegura la autocomprobación del circuito una vez por segundo. Cualquier defecto en los componentes electrónicos del detector y del programador da lugar a un paro de seguridad en unos 4 segundos.

Los programadores con microprocesador proporcionan una comprobación lógica continua de todo el circuito, la detección y solución de averías, la optimización de los períodos de prepurga y postpurga con el consiguiente ahorro de combustible y la secuencia automática de puesta en marcha y paro de la instalación.

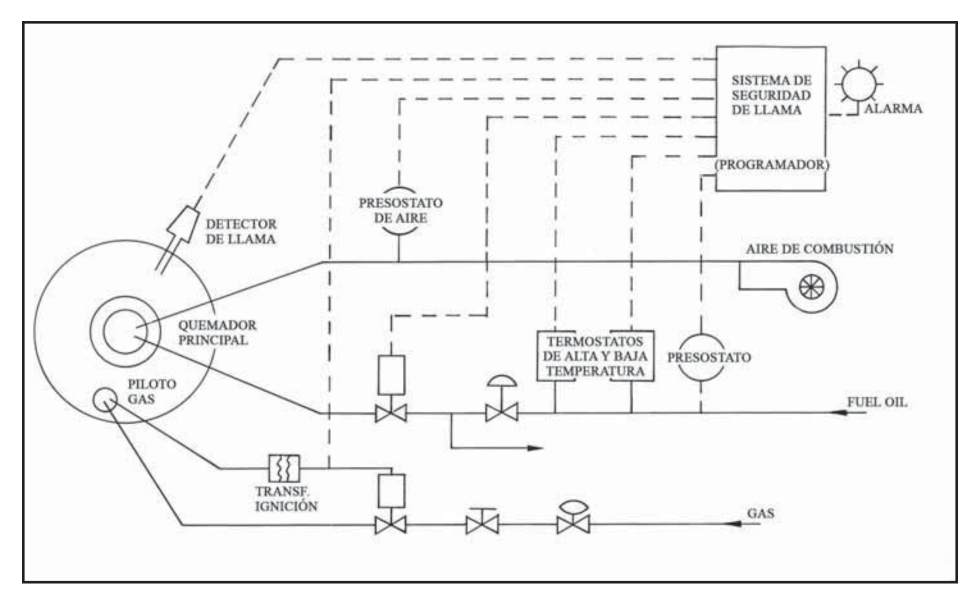


Figura 7.44 Supervisión de llama en quemador de caldera de vapor

7.1.7 Oxígeno disuelto

El *oxígeno disuelto* es la cantidad de oxígeno libre en el agua que no se encuentra combinado ni con el hidrógeno (formando agua) ni con los sólidos existentes en el agua.

La cantidad de oxígeno disuelto es vital para la vida marina. Sin oxígeno esta vida muere. La determinación del oxígeno disuelto es importante en el control de aireación y el tratamiento de aguas, y en el análisis de agua en calderas y en otras aplicaciones. La cantidad de oxígeno disuelto se mide en mg/l (miligramos de oxígeno por litro de agua), en p.p.m. (partes por millón), o bien, p.p.b. (partes por billón) y en % de saturación (relación entre la cantidad de oxígeno disuelta en el agua y la correspondiente a la saturación).

Siendo:

$$ppm = {}^{mg}\!/_{l} \times \frac{1}{densidad\ del\ agua\ en\ {}^{g}\!/_{cm^3}}$$

El oxígeno disuelto se mide con las técnicas galvánicas, electrodo de membrana (polarográfica), equilibrio y luminescente.

La *galvánica* dispone de una celda galvánica con compensación de temperatura que produce su propia corriente eléctrica gracias a la reducción del oxígeno en el cátodo. El ánodo es de plomo o plata y el cátodo es de plata con un electrolito de hidróxido potásico. Una resistencia convierte el paso de la corriente generada (microamperios) en mV que alimentan un transmisor. La reacción global que se produce es:

$$0_2 + 2Pb + 2OH^- \leftrightarrow 2PbO_2H^{--}$$

El campo de medida es de 0-25 mg/l y la exactitud del ± 1,5%. El tiempo de respuesta es de 1 minuto.

El sensor de oxígeno disuelto con *electrodo de membrana (polarográfico)* está basado en el principio de la célula Clark, es el más común y consiste en un cátodo de aleación oro-plata-platino y ánodo de plata-cloruro de plata sumergidos en un electrolito de solución de potasa y cloruro potásico en agua. Una fina membrana de teflón permeable a los gases permite la difusión del oxígeno procedente de la muestra de agua. Las reacciones químicas que tienen lugar son:

En el cátodo:

$$0_2 + 2H_20 + 4e- \rightarrow 40H^-$$

En el ánodo:

$$4Ag + 4ClK \rightarrow 4ClAg + 4K+ 4e^-$$

Y la reacción total es:

$$0_2 + 2H_20 + 4Ag + 4ClK \leftrightarrow 4ClAg + 4KOH$$

Como para cada molécula de oxígeno que se reduce entran cuatro electrones en la célula y cuatro abandonan el ánodo, se obtiene una corriente eléctrica de cátodo a ánodo que es directamente proporcional a la cantidad de oxígeno que pasó a través de la membrana. La tensión óptima entre ánodo y cátodo, que permite seleccionar el componente "oxígeno libre" en el agua, es de 0,8 V c.c. El campo de medida es de 0-20 mg/l y la exactitud del ± 1%.

El *sensor de equilibrio* de oxígeno dispone de tres electrodos con un electrolito de hidróxido potásico. El oxígeno del líquido difunde a través de la membrana del sensor y es reducido en el cátodo, mientras que una cantidad igual de oxígeno es generada en el ánodo. Las reacciones son:

Cátodo:

$$O_2 + 4H^- + 4e^- \rightarrow 2H_2O$$

Ánodo:

$$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^- + 4e^-$$

La difusión continúa hasta que se iguala la presión parcial de oxígeno en ambos lados de la membrana. La corriente necesaria para mantener este equilibrio indica la concentración de oxígeno en la solución.

El oxígeno disuelto viene influido por la temperatura, de aquí que es necesario incorporar al circuito termocompensadores que refieran automáticamente la medida a una temperatura estándar.

La exactitud en la medida es de ± 1%, 0,2 ppm o 2 ppb (5% de la lectura).

El sistema *óptico* o *luminescente (optode)* se basa en las características de amortiguamiento de la emisión de luz de una reacción luminiscente en presencia de oxígeno.

Una película sensible contiene la sustancia fluorescente sensible que está embebida en una capa polimérica soportada en una película de polímero. La concentración de oxígeno disuelto es inversamente proporcional a la vida luminiscente de la luz emitida por el proceso foto-luminiscente. Se mide el desfase entre la excitación y la emisión detectada y el desfase entre las dos. El campo de medida es de 0 a 20 mg/l y la exactitud de ± 0,1 a ± 0,2 mg/l. El tiempo de respuesta es de 1 minuto.

En la figura 7.45 pueden verse los sistemas de electrodo de membrana (polarográfico), el de equilibrio de oxígeno y el luminescente.

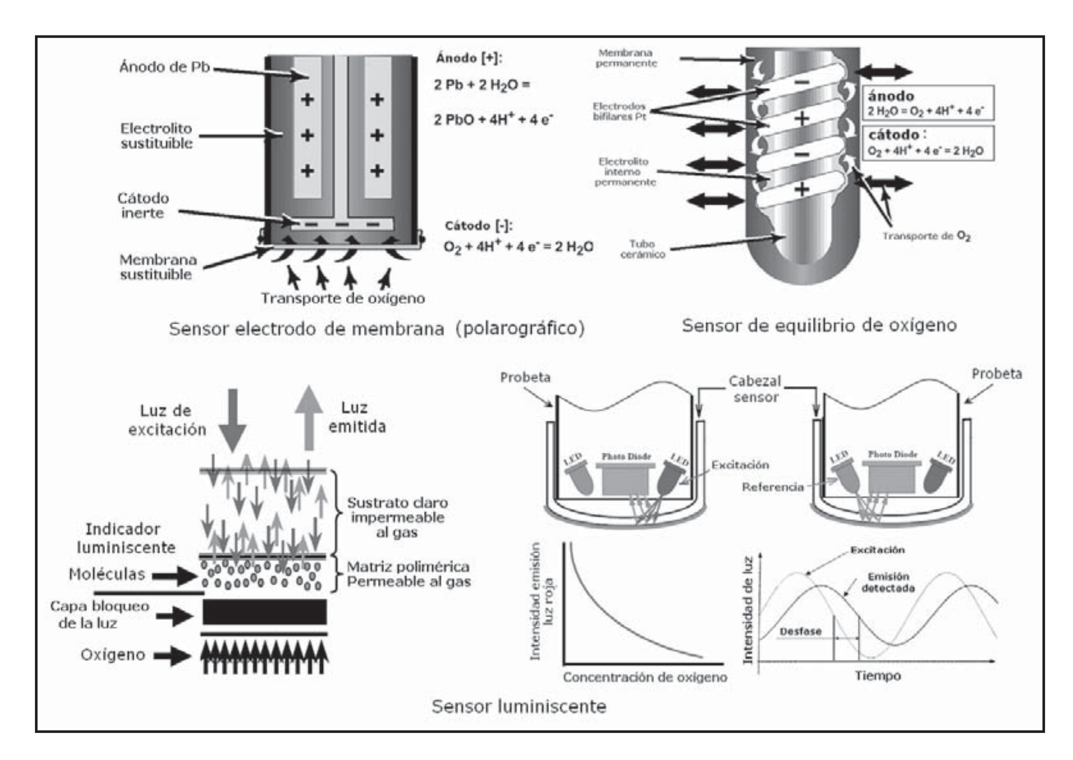


Figura 7.45 *Sensores electrodo de membrana (polarográfico), equilibrio de oxígeno y luminescente*

El oxígeno disuelto viene influido por la temperatura, de aquí que es necesario incorporar al circuito termocompensadores que refieran automáticamente la medida a una temperatura estándar. La exactitud en la medida es del ± 1%, 0,2 ppm o 2 ppb (5% de la lectura).

7.1.8 Turbidez

La *turbidez* es una medida de la falta de transparencia de una muestra de agua debida a la presencia de partículas extrañas. Estas partículas pueden ser plancton, microorganismos, barro, etc.

La medida de la turbidez se efectúa para determinar el grado de penetración de la luz en el agua o a su través y permite interpretar, conjuntamente con la luz solar recibida y la cantidad de oxígeno disuelto, el aumento o disminución del material suspendido en el agua.

La turbidez está expresada en unidades arbitrarias llamadas unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Por ejemplo, el agua de uso doméstico, industrial y residual tiene de 0,05 a 40 NTU.

El turbidímetro fue inventado por Jackson. Consiste en un tubo graduado que descansa en un soporte de vidrio, en cuya parte inferior se encuentra una vela encendida (*Jackson candle*). La muestra del agua se introduce lentamente en el tubo hasta que a su través deja de verse la llama de la vela. Ha dejado de utilizarse y actualmente la turbidez puede medirse de tres formas en forma continua.

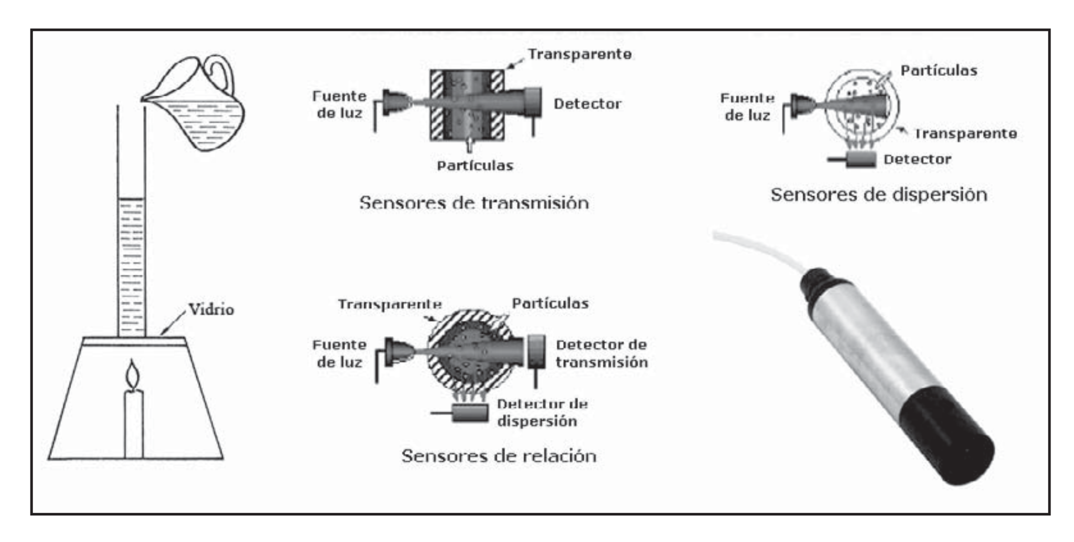


Figura 7.46 Sensores de turbidez de transmisión, reflexión, relación y el turbidímetro Jackson (Jackson candle). Fuente: Honeywell

Sensores de transmisión (luz directa absorbida). La lámpara y la célula están situadas una enfrente de la otra, separadas por un tubo transparente lleno de la muestra de agua. La célula mide la absorción de la luz por los sólidos en suspensión. La señal disminuye con el aumento de la turbidez. La exactitud en la medida es del ± 5% al ± 10% y el campo de medida es de 0-2400 NTU.

Sensores de dispersión (luz reflejada). Es el método más utilizado. Una lámpara emite un rayo de luz blanca, o bien una luz infrarroja, que un sistema de lentes enfoca en la muestra de agua. Una célula fotoeléctrica situada a 90° del haz de luz capta la luz reflejada por las partículas en suspensión. La intensidad de luz detectada es directamente proporcional a la turbidez del agua.

El aparato utiliza un detector de luz adicional para corregir las variaciones de intensidad luminosa, los cambios de color y la ligera suciedad de la lente. La señal aumenta con el aumento de la turbidez, lo que es favorable para detectar valores bajos de la turbidez. El campo de medida es de 0 a 1000 NTU y la exactitud es del ± 1%. El método de medida se encuentra en la norma ISO 7027/EN 27027.

Sensores de relación (relación entre la luz absorbida y la reflejada). Combina los dos métodos anteriores y favorece la eliminación de la influencia de los cambios de temperatura, la intensidad de luz de la fuente y aberraciones de la lente.

7.1.9 Intensidad de radiación solar

La *intensidad de radiación solar* tiene un interés particular en el tratamiento de aguas y en la determinación del rendimiento de los paneles solares. La radiación solar global (directa + difusa) se mide con un instrumento llamado *piranómetro*.

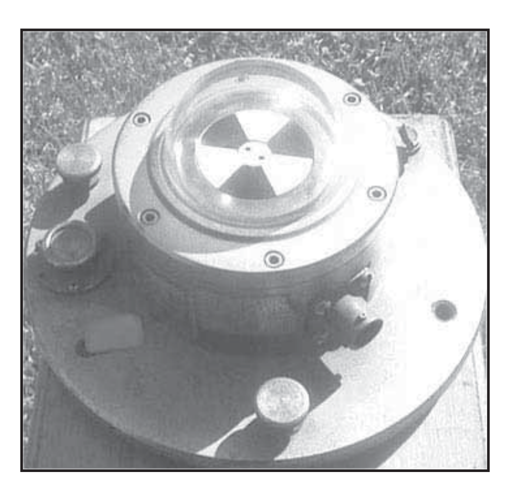


Figura 7.47 Piranómetro

Consiste en un detector provisto de placas blancas y negras que reflejan y absorben, respectivamente, la energía solar radiada. Una termopila de termopares de cobre-constantán recoge, en forma de corriente continua, la energía recibida por período de tiempo. La señal enviada es nominalmente del orden de 10 mV/caloría/cm^2/minuto, el campo de medida está entre 0-3 calorías/cm^2/minuto y la linealidad es del ± 1%.

7.2 Variables químicas

7.2.1 Conductividad en medio líquido

La *conductividad* es la capacidad de una solución acuosa para conducir una corriente eléctrica. El agua destilada pura no conduce, en principio, la corriente pero si se le disuelven sólidos minerales aumenta su capacidad de conducción. Estos sólidos, al disolverse, se separan en iones positivos y negativos, susceptibles de desplazarse bajo la acción de un campo eléctrico y también de combinarse con otros iones para formar iones nuevos o cuerpos distintos que ya no se ionizarán. La conductividad de los iones es función de su concentración y de su movilidad, de tal modo que dos electrodos a tensión sumergidos en un líquido, en el que existe una sal en solución, por ejemplo ClNa, producirán el fenómeno siguiente:

Los iones positivos Na^+ emigrarán al electrodo cargado negativamente, mientras que los iones negativos Cl^- serán atraídos por el electrodo positivo. Al llegar a los electrodos, los iones adquieren cargas de signo contrario y se neutralizan. De este modo, se establece una corriente a través de la solución y del circuito eléctrico exterior. Esta corriente depende exclusivamente del número y tipo de iones presentes en la solución, si se fijan el área efectiva de los electrodos, la diferencia de potencial, la distancia entre los electrodos y la temperatura de la solución. Si el producto está disociado totalmente, la corriente circulante será una medida directa de la concentración del mismo en la solución.

La *conductividad eléctrica específica* se define como el recíproco de la resistencia en ohmios, medida entre dos caras opuestas de un cubo de 1 cm de lado sumergido en la solución. La unidad es el mho o siemens (recíproco de ohmio), que es la conductancia de una solución, que con una diferencia de potencial de un voltio entre las caras de los electrodos, da lugar a la circulación de

un amperio. Como esta unidad es demasiado grande se emplea, a menudo, en soluciones diluidas el micromho (μmho), que es la millonésima parte de un mho, que también se llama microSiemens (μS). En la tabla 7.8 se indican los valores de conductividad de varios tipos de soluciones.

Temperatura de la muestra 25 °C	Conductividad, μS/cm
Agua ultrapura	0.05
Agua de alimentación a calderas	1 a 5
Agua potable	50 a 100
Agua de mar	53
5% NaOH	223
50% NaOH	150
10% HCl	700
32% de HCl	700
31% HNO_3	865

Tabla 7.8 *Valores de conductividad específica de soluciones dadas*

La conductividad es función del número de iones y de su movilidad. Esta depende de la temperatura y la conductividad del líquido y varía en un 2%/°C en sales neutras. El coeficiente de temperatura de la conductancia (factor k) varía entre 0,5 a 3.

Los electrodos de medida pueden ser de contacto con la solución o bien toroidales (inductivos o sin electrodos) sin contacto directo con la solución.

El sensor tradicional de 2 electrodos realiza dos funciones. La primera es la generación de una tensión de excitación de la solución acuosa y la segunda es la medición de la corriente que pasa a través de la solución cuando su conductividad varía. Esta doble función limita la amplitud del intervalo de medida (0-200 a 0-2.000 μSiemens/cm). La exactitud es del ± 1%.

Uno de los primeros sistemas de medida que se utilizó fue el formado por dos placas paralelas (los dos electrodos) situadas en la solución y conectadas a un circuito de puente de Wheatstone de corriente alterna (figura 7.48). El circuito tiene el inconveniente de que la acumulación gradual de suciedad en los electrodos falsea la medida.

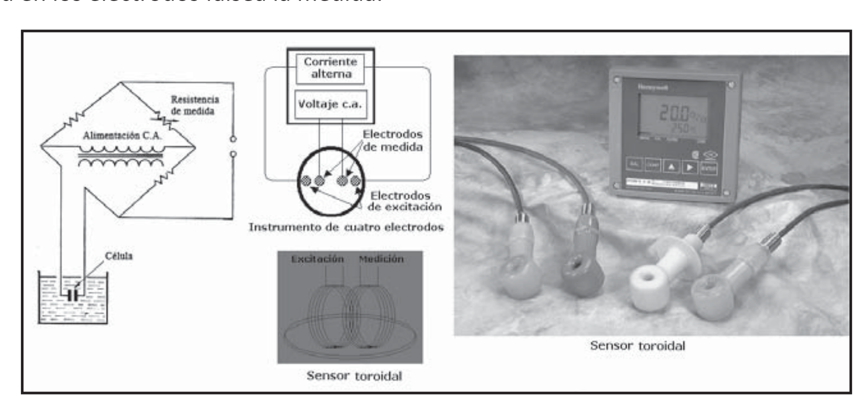


Figura 7.48 *Medida de conductividad por puente de Wheatstone de c.a., circuito de 4 electrodos y sensor toroidal. Fuente: Honeywell*

El sensor toroidal es adecuado para soluciones químicas agresivas y consiste en dos bobinas paralelas selladas con una sonda aislada y recubiertas de teflón. Una bobina es excitada con c.a., con lo que el campo magnético creado induce una c.a. débil en la solución, que depende de su conductividad. A su vez, esta corriente alterna induce una corriente en la otra bobina de captación, que es proporcional a la conductividad de la solución. De hecho, el líquido actúa como el núcleo de un transformador. Al no tener electrodos, no presentan polarización, ni recubrimiento o contaminación procedente del proceso. El campo de medida es de 0-200 a 0-2.000.000 µSiemens/cm. La exactitud es de ± 20 µS/cm o del ± 5%.

La medida de la conductividad requiere la compensación de la temperatura de la solución con relación a la temperatura estándar escogida de 25 °C. Esta compensación suele ser automática, consistiendo en un termistor y una resistencia R_n.

A señalar que la adición de un microprocesador permite obtener, por hardware o software, circuitos potenciométricos de conductividad de diferentes características, ya que dispone en memoria de tablas de conductividad.

7.2.2 pH

El *pH* es una medida de la acidez o alcalinidad del agua con compuestos químicos disueltos. Su expresión viene dada por el logaritmo de la inversa de la concentración del ion H, expresada en moles por litro:

$$pH = log\frac{1}{\left[H^{+}\right]}$$

Señalemos que el agua pura neutra tiene una concentración de ion hidrógeno de 10^{-7} moles por litro. Luego, el pH será:

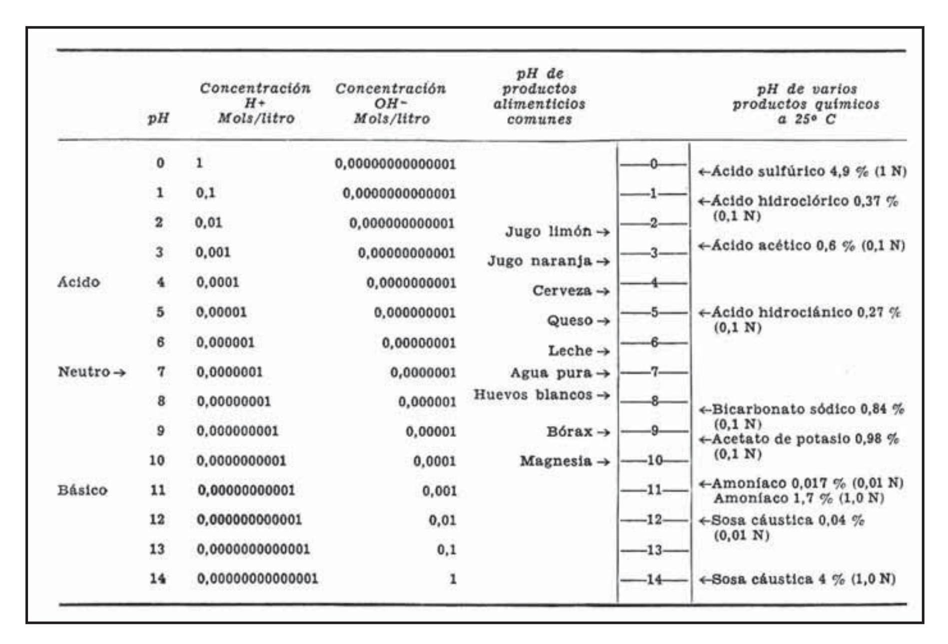
$$pH = log\frac{1}{\left[10^{-7}\right]} = 7$$

Una disolución ácida tiene mayor concentración de ion hidrógeno que el agua pura y, por lo tanto, su pH será menor de 7. Una disolución básica le ocurre a la inversa y su pH será mayor de 7. Las medidas prácticas del pH se encuentran entre los valores 0 a 14. En la tabla 7.9 figuran las concentraciones de varios tipos de soluciones con su pH correspondiente.

En la medida de pH pueden utilizarse varios métodos, de entre los cuales los más exactos y versátiles de aplicación industrial son: el sistema de electrodo de vidrio y el de transistor (ISFET = *Ion Sensitive Field Effect Transistor*).

El *electrodo de vidrio* consiste en un tubo de vidrio cerrado en su parte inferior con una membrana de vidrio especialmente sensible a los iones hidrógeno. En la parte interna de esta membrana se encuentra una solución de cloruro tampón, de pH constante, dentro de la cual está inmerso un hilo de plata recubierto de cloruro de plata.

Aunque el mecanismo que permite que el electrodo de vidrio mida la concentración de ion hidrógeno no es exactamente conocido, está establecido que al introducir el electrodo en el líquido se desarrolla un potencial relacionado directamente con la concentración del ion hidrógeno del líquido. Es decir, si esta concentración es mayor que la interior del electrodo existe un potencial positivo a través de la punta del electrodo y, si es inferior, el potencial es negativo.



	pH	Concentración H+ Mols/litro	Concentración OH- Mols/litro	pH de productos alimenticios comunes	pH de varios productos químicos a 25° C
	0	1	0,00000000000001		←Ácido sulfúrico 4,9 % (1 N)
	1	0,1	0,0000000000001		←Ácido hidroclórico 0,37 % (0,1 N)
	2	0,01	0,000000000001	Jugo limón →	
	3	0,001	0,00000000001	Jugo naranja →	←Ácido acético 0,6 % (0,1 N)
Ácido	4	0,0001	0,0000000001	Cerveza →	
	5	0,00001	0,000000001	Queso →	←Ácido hidrociánico 0,27 % (0,1 N)
	6	0,000001	0,00000001	Leche →	
Neutro →	7	0,0000001	0,0000001	Agua pura →	
	8	0,00000001	0,000001	Huevos blancos →	←Bicarbonato sódico 0,84 % (0,1 N)
	9	0,000000001	0,00001	Bórax →	←Acetato de potasio 0,98 % (0,1 N)
	10	0,0000000001	0,0001	Magnesia →	
Básico	11	0,00000000001	0,001		←Amoníaco 0,017 % (0,01 N) Amoníaco 1,7 % (1,0 N)
	12	0,000000000001	0,01		←Sosa cáustica 0,04 % (0,01 N)
	13	0,0000000000001	0,1		
	14	0,00000000000001	1		←Sosa cáustica 4 % (1,0 N)

Tabla 7.9 Valores de pH de varias soluciones

Este potencial cambia con la temperatura, por ejemplo, pasa de 54,2 mV a 0 °C a 74 mV a 100 °C por unidad de pH. Para medir el potencial desarrollado en el electrodo de vidrio es necesario disponer, en la solución, de un segundo elemento o electrodo de referencia. Éste, aparte de cerrar el circuito, suministra un potencial constante que sirve de referencia para medir el potencial variable del electrodo de vidrio. El electrodo de referencia contiene una célula interna formada por un hilo de plata recubierto con cloruro de plata en contacto con un electrolito de cloruro de potasio. Este electrolito pasa a la solución muestra a través de una unión líquida. De este modo, la célula interna del electrodo permanece en contacto con una solución que no varía de concentración y que, por lo tanto, proporciona una referencia estable de potencial.

En la figura 7.49 puede verse la disposición interna de los electrodos y los potenciales que miden.

Los potenciales existentes son los siguientes:

- E_1: Potencial entre el electrodo metálico interior y la solución tampón que puede considerarse constante para una temperatura dada. Las temperaturas extremadamente altas pueden dar lugar a la disolución del revestimiento de cloruro de plata del electrodo.
- E_2: Caída de potencial entre el electrodo interior y la cara interna de la membrana de cristal que puede considerarse despreciable.
- E_3: Potencial entre solución tampón y superficie de la membrana de cristal que es constante gracias a la estabilidad de la solución tampón y de la membrana de cristal.
- E_4: Caída de potencial a través de la membrana que se mantiene constante en cortos períodos mientras la membrana de cristal no sufra alteraciones de origen químico o mecánico. Si este potencial deriva, se calibra con una solución tampón de pH conocido.
- E_5: Potencial entre superficie exterior de la membrana de cristal y la solución ensayada que varía con la concentración de iones hidrógeno (pH) de la solución ensayada.

E_6: Caída de potencial a través de la solución ensayada que se considera despreciable, salvo si se trata de agua poco conductora o de soluciones no acuosas.

E_7: Representa el potencial de la unión líquida entre la solución ensayada y la de referencia. Su valor es despreciable, aunque un atascamiento o un exceso de presión externa contra la unión puede influir en la medición.

E_8: La caída de potencial dentro del electrodo de referencia es despreciable.

E_9: Potencial de contacto entre el electrodo de referencia y la solución de CIK que puede considerarse constante si dicha solución no está contaminada.

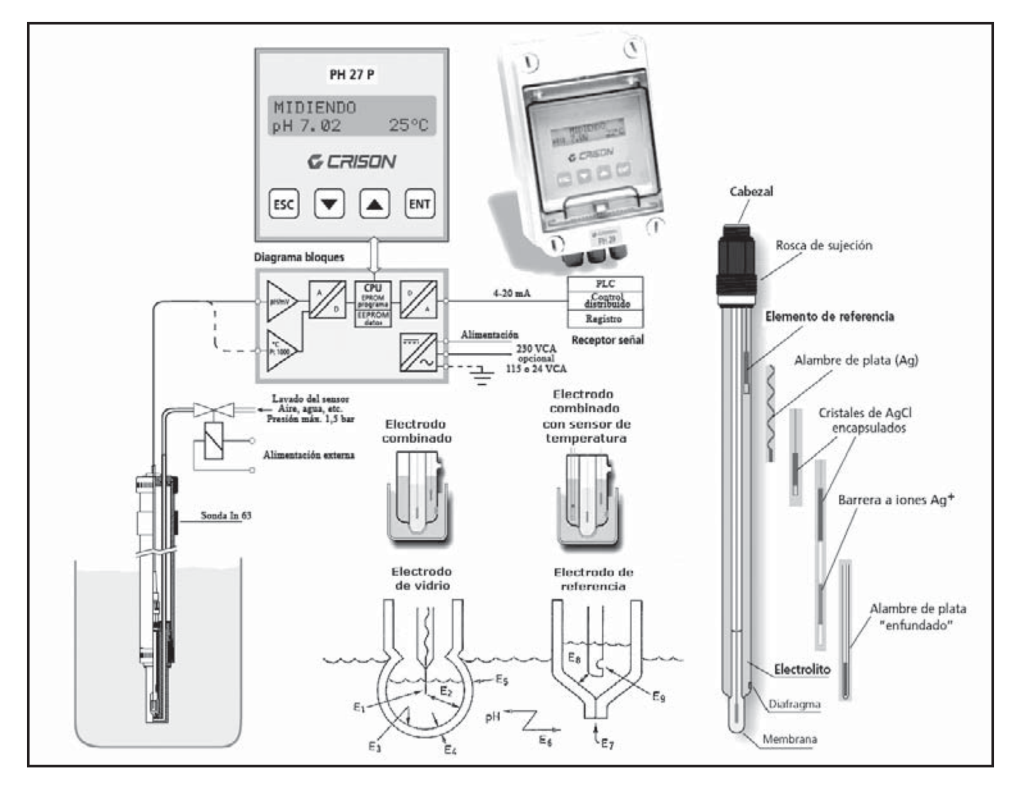


Figura 7.49 Electrodos y potenciales en la medida del pH. Fuente: Crison

La ecuación de Nernst da la f.e.m. E_5, desarrollada en el electrodo de referencia.

$$E = \frac{RT}{F} ln \frac{\left[H^+\right] exterior\ al\ electrodo}{\left[H^+\right] interior\ en\ el\ electrodo} = -\frac{RT}{F}\ pH$$

en la que:

E = potencial

R = constante de los gases perfectos

F = número de Faraday

T = temperatura absoluta

$[H^+]$ = concentración de iones hidrógeno

La medida del pH con el electrodo de vidrio se reduce a medir un potencial resultante entre los electrodos de E_1 - E_9 con una resistencia interna considerable. En la medida pueden presentarse algunas dificultades. Las más comunes son:

a) Recubrimiento o abrasión de la membrana del electrodo de vidrio (influye en el potencial E_4 y/o en el E_5.
b) Soluciones no acuosas o de alta resistencia (influye en E_6 y E_5).
c) Taponamiento o fallo mecánico de la unión del líquido en el electrodo de referencia (influye en E_7) que impide el paso de CIK, quedando el circuito abierto. Si el taponamiento es parcial se desarrolla un potencial indeterminado.
d) Entrada de la solución de ensayo dentro de la solución interna del electrodo de referencia (influye en E_6 y de modo más importante en E_9) con lo que se destruye el potencial constante deseado.
e) Variación con el tiempo del potencial de asimetría que depende de la naturaleza del vidrio, del tipo de fabricación, de las impurezas, de la disolución gradual del vidrio en la solución, del desgaste por erosión de la punta del vidrio, etc. Este potencial sólo es de unos pocos mV, pero se mantiene constante aunque existan las mismas soluciones a ambos lados del electrodo de vidrio. Los instrumentos de pH disponen de un ajuste para corregir este potencial.

La variación de temperatura influye en la medida del pH. A pH constante alcanza los 0,2 milivoltios por grado centígrado. En la figura 7.50 puede verse esta influencia. Como en el instrumento final de indicación, registro o control la medida se realiza en unidades de pH en lugar de mV, es necesario compensar la influencia de las variaciones de temperatura de la solución de ensayo. Hay que señalar que el termocompensador, o sonda de resistencia, sólo compensa la relación tensión-temperatura del electrodo de vidrio y que sólo asegura la medida del pH real de la solución a su temperatura real. No detecta las variaciones con la temperatura propias del pH de cada solución, que siguen una ley distinta de una solución a la otra y para las cuales habría que diseñar un compensador especial para cada una de ellas.

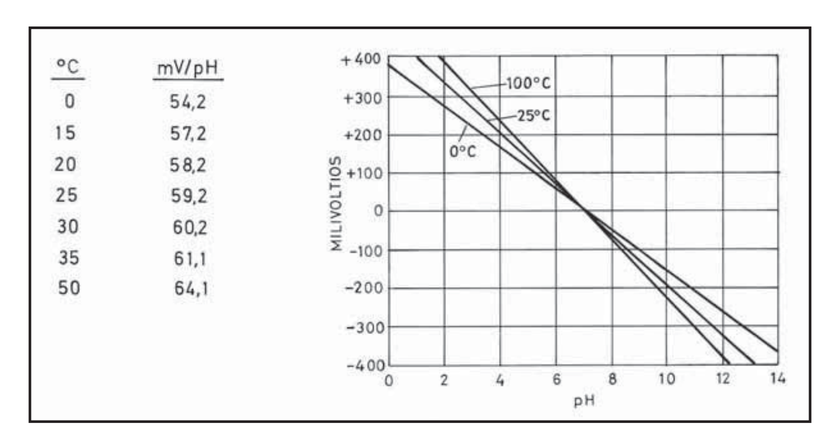


Figura 7.50 Relación mV-pH en función de la temperatura

Así, pues, la medida del pH sólo es válida a la temperatura a la que se encuentra la solución.

En la medición del pH puede presentarse el recubrimiento de los electrodos, en cuyo caso el electrodo se comporta como si apreciara bajas concentraciones de ion H^+ y, por tanto, el instrumento registrador leería altos valores de pH. En estos casos es, pues, necesario limpiar periódicamente el electrodo con una frecuencia que la experiencia determina en cada caso. Existen métodos automáticos de limpieza (ultrasonidos, chorro de limpieza, cepillos mecánicos) que todavía no han dado un resultado completamente satisfactorio y dispositivos de extracción manual o automática que permiten la extracción y limpieza del electrodo sin interrumpir el servicio.

La exactitud es del ± 0,01 pH a ± 0,2 pH.

El *electrodo de transistor ISFET* (*Ion Sensitive Field Effect Transistor*) es prácticamente irrompible, de estado sólido y proporciona una respuesta muy rápida. El sensor posee una señal de pH de baja impedancia, lo que le da una gran fiabilidad, y tiene una larga duración, funcionando en los líquidos más sucios y con más impurezas. Incorpora un electrodo de referencia recambiable. La tensión generada por el elemento es:

$$V_{Banda\ plana} = E_{referencia} - \Psi_0 + \chi_{solución} - \frac{\phi_{Si}}{q} - \frac{Q_{ss} + Q_{ox}}{C_{ox}}$$

en la que:

$E_{referencia}$ = potencial del electrodo de referencia

Ψ_0 = potencial superficial resultante de la reacción química

$\chi_{solución}$ = potencial bipolar superficial de la solución = constante

ϕ_{Si} = propiedad del material de silicio = constante

q = carga del electrón

Q_{ss} = densidad del estado superficial en el silicio

Q_{ox} = carga fija del óxido

C_{ox} = capacitancia asilante de la puerta (*gate*)/área unidad

ISFET se diseña para que el potencial Ψ_0, que es sensible al pH del electrolito, tenga la máxima sensibilidad y selectividad. En la figura 7.51 puede verse el electrodo de transistor ISFET.

La exactitud es del ± 0,01 pH o ± 0,1%.

7.2.3 Redox (potencial de oxidación-reducción)

El *potencial de oxidación-reducción* de materiales disueltos en agua se mide con un metal noble y un electrodo de referencia y es una medida de su potencial electrónico de equilibrio y de su capacidad relativa para reaccionar con otros materiales oxidantes o reductores que pueden añadirse al agua.

Hay que señalar que en la medida del pH, el electrodo de vidrio capta los cambios en la concentración del ion hidrógeno activo, mientras que en la medida del potencial de oxidación-reducción, el electrodo de metal noble (normalmente es platino) es sensible a los cambios en la relación entre el agente reductor y el agente oxidante. Así, pues, el electrodo de metal noble puede denominarse "electrodo sensible a los electrones" de forma paralela al electrodo de vidrio considerado como "elemento sensible al ion hidrógeno".

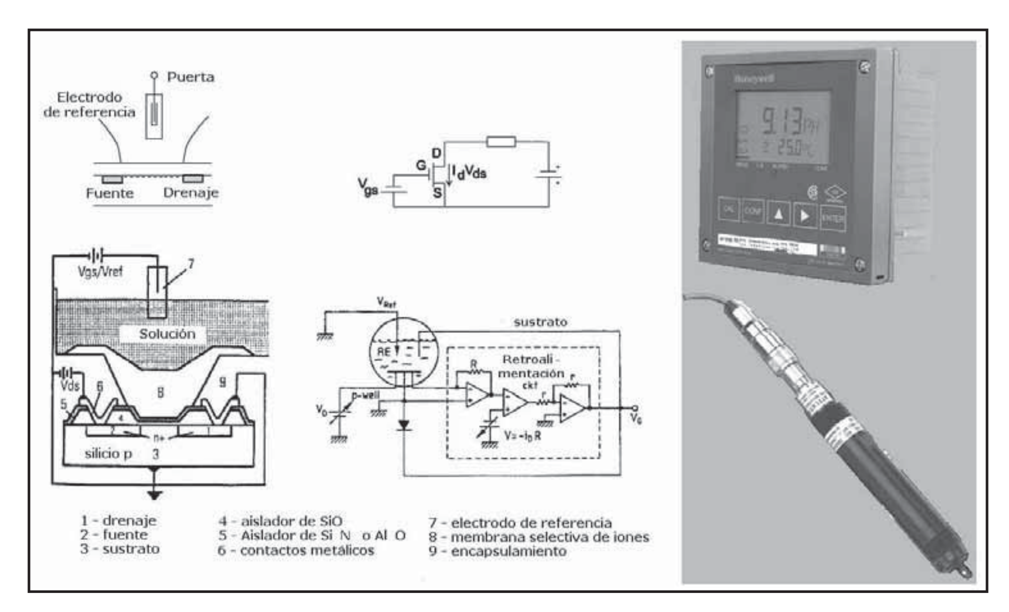


Figura 7.51 *Electrodo de transistor ISFET. Fuente: Honeywell*

El estándar cero de medida de potencial es el del electrodo de hidrógeno definido como:

$H_2 = 2H^+ + 2e^-$

E_0 = 0,000 voltios

Este estándar se aplica en laboratorio; en la industria se utilizan principalmente dos tipos de electrodos:

1. Electrodo de plata/cloruro de plata con electrólito 4NCIK de E_0 = -0,199 voltios.
2. Electrodo de calomel con electrólito de CIK saturado con E_0 = 0,244 voltios.

La medida del potencial de oxidación-reducción viene dada por la diferencia de potencial entre el electrodo de metal noble y el de referencia según la fórmula:

$$ORP = E_h - E_0 = -\frac{RT}{nF} ln \frac{(oxid)}{(red)}$$

en la que:

E_h = potencial de oxidación relativo al electrodo de hidrógeno

E_0 = potencial de oxidación del electrodo de referencia relativo al electrodo de hidrógeno

R = constante de los gases perfectos

T = temperatura absoluta

n = número de electrones transferidos

F = carga de Faraday

$(oxid)$ = concentración del material en forma oxidante

(red) = concentración del material en forma reductora

Los instrumentos amplificadores e indicadores o registradores de Redox utilizan la misma construcción y los mismos circuitos básicos que los instrumentos de pH. Su exactitud es de ± 1 mV.

7.2.4 Concentración de gases

En la industria interesa determinar la *concentración de los gases* tales como CO_2, $CO + H_2$, O_2 u otros, bien en el análisis de humos de salida de las calderas de vapor para comprobar su combustión correcta, bien en el análisis de concentración de gases desde el punto de vista de seguridad ante una eventual explosión, etc.

Los analizadores se basan, en general, en propiedades características de los gases, tales como la conductibilidad térmica, el paramagnetismo del oxígeno y el coeficiente de absorción infrarroja.

7.2.4.1 Conductividad térmica

Un caso clásico de aplicación del principio de *conductividad térmica* es la determinación del contenido en dióxido de carbono de los gases de combustión de una caldera de vapor. Esta determinación se basa en la diferente conductividad térmica de dicho gas cuando se compara en una célula con el aire u otros posibles constituyentes del gas de combustión. El gas se aspira con una bomba y pasa a la célula. Ésta contiene un hilo de resistencia calentado eléctricamente y mantenido a una temperatura ligeramente superior a la de las paredes. Con un buen diseño, y limitando la elevación de temperaturas del hilo caliente, se consigue que la transmisión de calor por convección y radiación sea despreciable y que la temperatura y, por consiguiente, la resistencia del hilo central sea inversamente proporcional a la conductividad del gas que lo rodea. Las variaciones en la temperatura del gas y del instrumento se compensan por medio de una célula cerrada idéntica de medida de la conductividad térmica, que contiene aire de composición conocida (o bien dos células de muestra y dos células de referencia). La medida efectuada en la práctica es la diferencia de resistencia de los hilos en contacto con el aire y con el gas de combustión, respectivamente, y se realiza con un circuito de puente de Wheatstone (figura 7.52).

El sistema se utiliza básicamente para la mezcla aire-CO_2 pero también puede emplearse en otros gases.

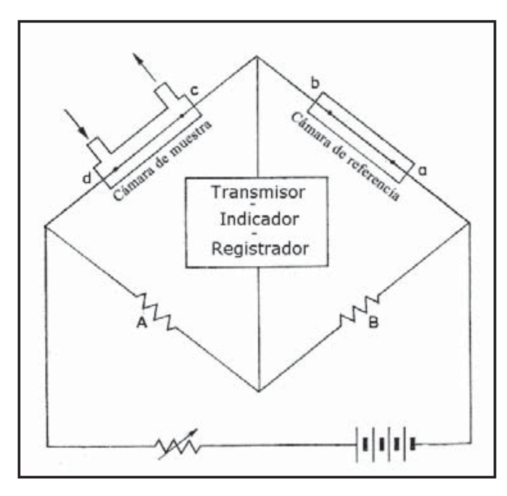


Figura 7.52 Analizador de conductividad térmica

Otro ejemplo de utilización de estos analizadores lo constituye la determinación del *monóxido de carbono e hidrógeno* en los gases de combustión de la caldera de vapor. Como estos gases son combustibles se queman con un exceso de aire y se determina el calor desprendido en un tubo provisto de un alambre calentado eléctricamente, cuya resistencia varía con el aumento de la temperatura en la combustión. El alambre se conecta a una rama de un puente de Wheatstone, y las variaciones en la temperatura exterior se compensan intercalando un tubo semejante, pero cerrado en la rama opuesta. El resultado expresado en porcentaje $CO + H_2$ se convierte en señal indicada o registrada.

En otra aplicación se determina el contenido de oxígeno en los gases de combustión, por la *variación de conductividad térmica* cuando los gases se pasan sobre carbono a temperatura elevada, con lo que todo el oxígeno presente se convierte en dióxido de carbono. El instrumento es semejante al utilizado para la determinación de $C0_2$, con un par de células de conductividad térmica en cada rama de un puente de Wheatstone. Los gases de combustión se hacen pasar a través de un par, a continuación por un pequeño horno que contiene barras de carbono a temperatura elevada y, finalmente, a través del otro par de células. Se mide el cambio en la conductividad térmica y, por consiguiente, el aumento en la proporción de $C0_2$. El resultado puede indicarse o registrarse.

El *sensor de película delgada* está basado en la combustión de monóxido de carbono y oxígeno sobre una superficie catalítica. En un disco formado por una base de tinta de platino se imprimen 4 cuadrantes y sobre dos de ellos se deposita un catalizador. Cada cuadrante forma parte de un brazo de un puente de Wheatstone. El disco se calienta a 300 °C y, en estas condiciones, entra la muestra del gas a analizar, con lo que el monóxido de carbono del gas entra en combustión sobre las superficies catalíticas provocando un calentamiento de las mismas. La corriente en el circuito cambia y se produce una señal de salida proporcional al monóxido de carbono de la muestra.

El *sensor de cerámica (zirconio)* aprovecha el fenómeno de la conducción de la electricidad a altas temperaturas por medio de iones de oxígeno con carga. Zirconio es uno de los materiales cerámicos que tiene esta propiedad. Un disco de zirconio separa el gas a medir de un gas de referencia dentro de un calefactor. Si la concentración de oxígeno es diferente, se genera un voltaje que es detectado por unos electrodos.

Otro aparato completo que trabaja según el principio de la conductividad térmica es el *cromatógrafo* que permite determinar los componentes de una muestra de gas en pocos minutos. Consta de una columna de separación de los componentes del gas, una toma de muestras, una cámara de temperatura controlada encerrando el detector y un registrador que marca, en el gráfico, los picos correspondientes a los componentes.

En la columna se inyecta una cantidad exacta del gas a analizar y ésta absorbe en forma distinta a cada uno de los componentes de tal modo que éstos avanzan a distinta velocidad llegando, uno tras otro, al detector de conductividad que compara las conductividades térmicas entre el gas portador y la mezcla, dando una tensión proporcional a la concentración del gas correspondiente. El área de cada pico indica la cantidad de cada componente en la mezcla y el tiempo de retención identifica la clase de componente.

En la figura 7.53 puede verse el diagrama de un cromatógrafo y los componentes identificados en un ensayo.

Del cromatógrafo de gases derivan:

- *Detector de ionización de la llama.* Se trata de un detector horizontal de llama que capta los iones producidos por la muestra del gas a analizar cuando éste entra en combustión al fluir

sobre la llama. Se genera una corriente proporcional a la concentración del componente ionizado del gas. La llama base se mantiene con un caudal de hidrógeno de 30 a 50 cc/minuto y un caudal de aire de 200 a 300 cc/minuto.

- *Detector fotométrico de llama.* Es un detector horizontal de llama de hidrógeno que detecta componentes de azufre volátiles, adecuado para medir trazas de estos componentes (SH_2, SCO, SO_2, SC_2 y Mercaptanos). En la llama, rica en hidrógeno, del detector se reducen los componentes elementales y se produce una llama azul quimioluminiscente en el espectro visible, que pasa a través de un filtro óptico de banda estrecha (395 nanómetros) a un tubo fotomultiplicador y a un amplificador. La intensidad de la luz azul es aproximadamente proporcional al cuadrado de la concentración de azufre en la llama.
- *Detector quimioluminescente de azufre.* En el proceso de detección del gas a analizar, el monóxido de azufre reacciona con ozono para formar dióxido de azufre que emite luz cuando pasa al estado de reposo. Esta respuesta luminosa es lineal y la luz emitida se detecta y amplifica mediante un fotomultiplicador.

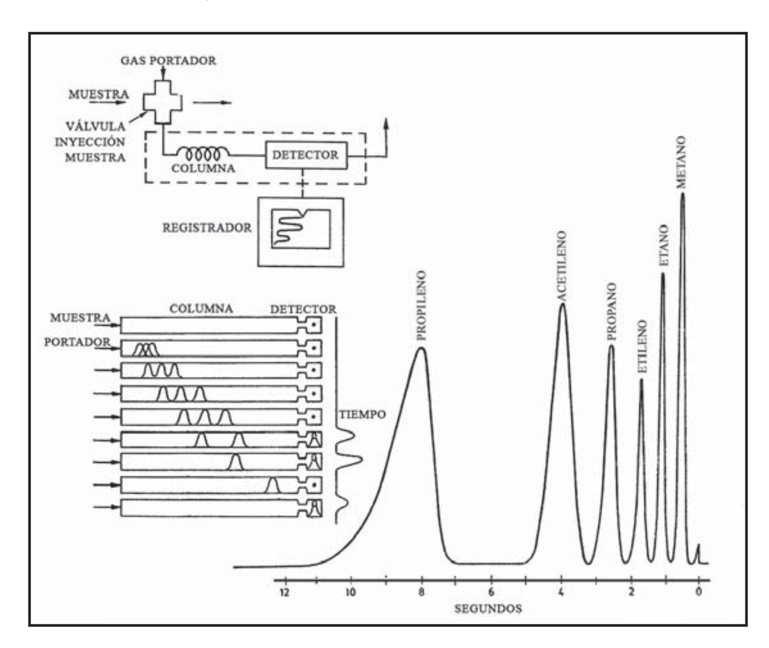


Figura 7.53 Cromatógrafo

La muestra se inyecta mediante una válvula de inyección cromatográfica al flujo del gas portador, que pasa a dos cámaras de combustión sin llama. Se introduce aire adicional en la primera cámara, mientras que en la segunda se introduce hidrógeno. La matriz de hidrocarburo de la muestra se oxida a dióxido de carbono y agua, mientras que los componentes de azufre pasan a SO_2, agua, CO_2 y algo de SO.

En la célula de reacción, mantenida en un vacío predeterminado, entran los gases de la segunda cámara de combustión y ozono procedente de un generador de ozono. Las reacciones que se producen en la célula son:

$$RH + RS + O_2 \leftrightarrow SO + SO_2 + CO_2 + H_2O$$

$SO + O_3 \leftrightarrow SO_2 \leftrightarrow SO_2 + hv$

A medida que aumentan las reacciones, el dióxido de azufre (SO_2) producido pasa al estado de reposo, a través de mecanismos de colisión entre moléculas y aparece la luminiscencia.

7.2.4.2 Paramagnetismo del oxígeno

El *paramagnetismo* es una propiedad que poseen varios materiales, entre ellos el oxígeno; se magnetizan cuando se exponen a la acción de un campo magnético. De este modo una bola suspendida en equilibrio en un campo magnético variará de posición al pasar el gas a analizar ya que el oxígeno del gas absorberá parte de la energía magnética disponible en el campo.

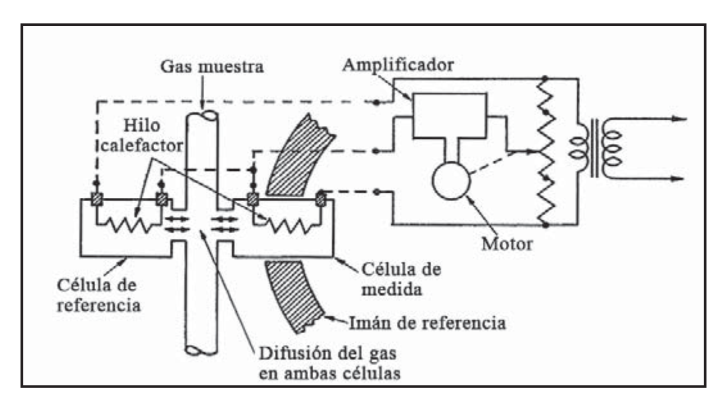


Figura 7.54 Analizador de oxígeno paramagnético

Este principio se emplea en el analizador de la figura 7.54, en el que el gas circula por dos cámaras idénticas con dos pequeños calefactores. Uno de ellos está en el seno de un fuerte campo magnético con lo que el oxígeno, que es paramagnético, desplaza a otros gases y el elemento calefactor se enfría más rápidamente. De este modo, las diferencias de temperatura medidas con un circuito de puente de Wheatstone son proporcionales a la susceptibilidad magnética del gas y, al ser el oxígeno el único gas paramagnético presente, son también proporcionales al contenido de oxígeno.

7.2.4.3 Analizador de infrarrojos

El *analizador de infrarrojos* (figura 7.55) fue estudiado ya al describir la medida del punto de rocío de los gases. La radiación infrarroja es sólo una pequeña porción del espectro electromagnético, y es absorbida en cantidades distintas por varios gases. Algunos gases tales como el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno, el cloro y otros elementales no absorben, prácticamente, radiaciones infrarrojas. Otros, sin embargo, como el CO_2, CO, CH_4, C_3H_8, SO_2, NH_3 o vapor de agua lo absorben en cantidades detectables.

El análisis cuantitativo realizado sigue la ley de Beer-Lambert que relaciona la cantidad de luz absorbida con la concentración de la mezcla y la longitud del camino de la radiación:

$$A = abc = log_{10} \frac{I_0}{I}$$

en la que:

A = absorbancia

I = radiación infrarroja que alcanza el detector con la muestra en el camino de la radiación

I_0 = radiación infrarroja que alcanza el detector sin la muestra en el camino de la radiación

a = coeficiente de absorción de los componentes puros de interés en la longitud de onda analizada (depende de las unidades seleccionadas para b y c)

b = longitud del camino seguido por la muestra

c = concentración del componente de la muestra

Señalemos que para preparar el analizador para un gas determinado, por ejemplo el CO_2, se llena la célula de comparación con un gas no absorbente, por ejemplo el N_2, y la cámara detectora con CO_2 y recordemos que la radiación infrarroja es interrumpida, alternativamente, hacia la célula de comparación y hacia la de muestra. En estas condiciones, la radiación que pasa a través de la célula de comparación no se atenúa mientras que la que atraviesa la célula de muestra, si el gas contiene CO_2, es absorbida proporcionalmente al porcentaje de CO_2. Ambas radiaciones inciden, alternativamente, en las dos cámaras del detector y varían alternativamente la presión, captándola mediante un condensador microfónico (o bien de estado sólido), una de cuyas placas es la membrana metálica que divide las dos cámaras. El detector microfónico tiene la desventaja de su sensibilidad a las vibraciones y su alto coste. La señal es amplificada, rectificada y registrada. El detector de estado sólido consta de seleniuro de plomo, termopilas y detectores piroeléctricos y presenta más baja sensibilidad que el microfónico cuando las concentraciones del gas son bajas.

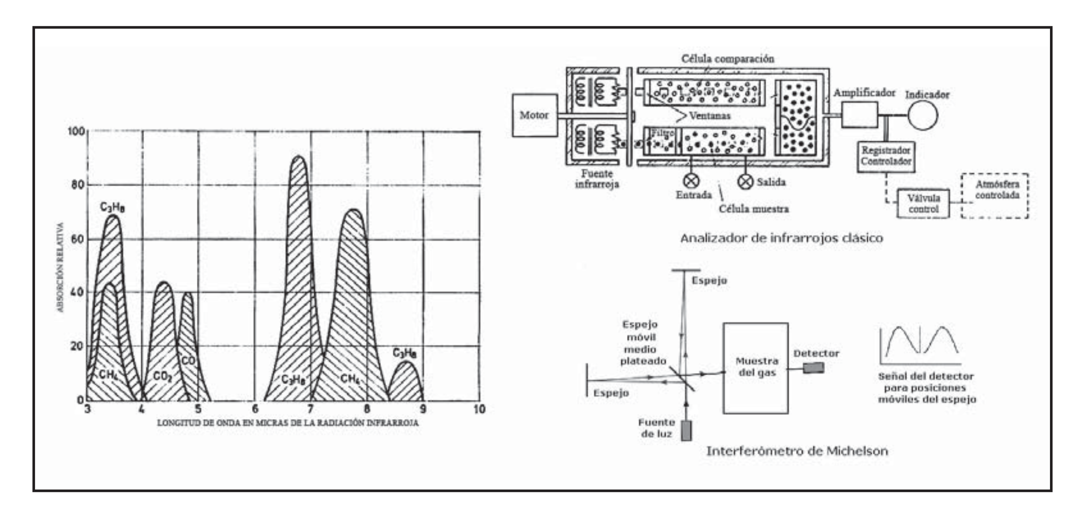


Figura 7.55 *Analizador de infrarrojos*

Otros sistema parecido al analizador de infrarrojos utiliza un *interferómetro de Michelson*. En lugar de separar diferentes longitudes de onda, realiza el análisis en una zona puntual próxima a la radiación infrarroja, en 3,4 micrometros donde todos los hidrocarburos absorben la radiación infrarroja y el agua y el CO_2 son relativamente transparentes.

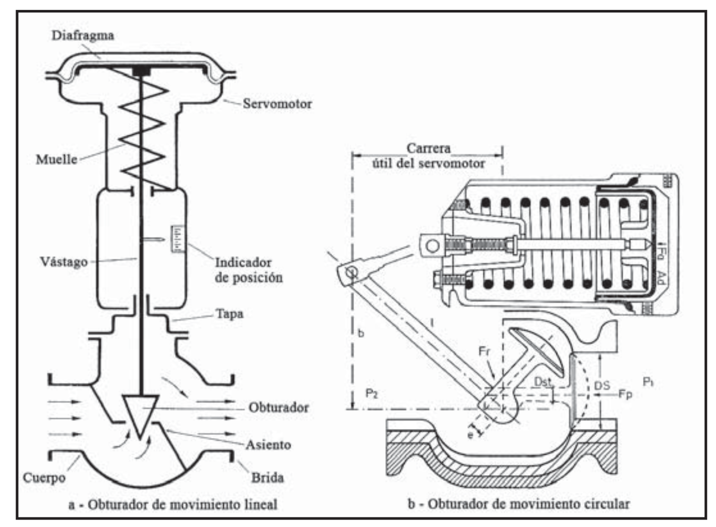
El instrumento analizador de infrarrojos puede medir las concentraciones de gases tales, como el dióxido de carbono CO_2 (0-2%), monóxido de carbono CO (0-10%), metano CH_4 (0-25%) y amoníaco NH_3 (0-1%).

Capítulo 8
Elementos finales de control

8.1 Válvulas de control

8.1.1 Generalidades

En el control automático de los procesos industriales, la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal de fluido de control que modifica, a su vez, el valor de la variable medida, comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador. En la figura 8.1 puede verse una válvula de control típica. Se compone básicamente del cuerpo y del servomotor.



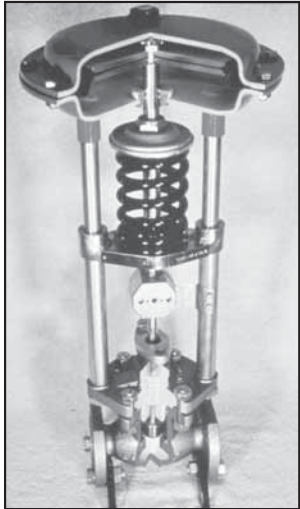


Figura 8.1 *Válvula de control típica. Fuente: Honeywell*

La válvula de control neumática consiste en un servomotor accionado por la señal neumática de 3-15 psi (0,2-1 Kg/cm^2). El servomotor está conectado directamente a un vástago que posiciona el obturador con relación al asiento. La posición relativa entre el obturador y el asiento permite pasar el fluido desde un caudal nulo (o casi nulo) hasta el caudal máximo, y con una relación entre el caudal y la carrera que viene dada por las curvas características de la válvula.

El cuerpo de la válvula de control contiene en su interior el obturador y los asientos, y está provista de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor.

8.1.2 Tipos de válvulas

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador. Básicamente, se clasifican en dos grandes grupos: válvulas con obturador de *movimiento lineal* y válvulas con obturador de *movimiento rotativo*.

8.1.2.1 Válvulas con obturador de movimiento lineal

Las válvulas de movimiento lineal, en las que el obturador se mueve en la dirección de su propio eje, se clasifican en válvula de globo, válvula en ángulo, válvula de tres vías mezcladora o diversora, válvula de jaula, válvula de compuerta, válvula en Y, válvula de cuerpo partido, válvula Saunders y válvula de compresión.

8.1.2.1.1 Válvula de globo

Llamada así por disponer de un obturador en forma de globo, se caracteriza porque el flujo de entrada o salida es perpendicular al eje del obturador. Pueden verse en las figuras 8.2a, 8.2b y 8.2c y son de *simple asiento*, de *doble asiento* y de *obturador equilibrado*.

Las válvulas de simple asiento, que cierran en contra de la presión del proceso, precisan de un actuador de mayor tamaño. Por lo tanto, se emplean cuando la presión diferencial del fluido es baja y se precisa que las fugas, a través de la válvula con el obturador en posición de cierre, sean mínimas. El cierre estanco se logra con asientos provistos de una arandela de teflón o de otros materiales blandos.

En la válvula de doble asiento, o de simple asiento con obturador equilibrado, la fuerza de desequilibrio desarrollada por el fluido a través del obturador es menor que en la válvula de simple asiento. Esto es debido a que, en la válvula de doble asiento, el fluido actúa en sentidos contarios sobre los obturadores, y en la válvula con obturador equilibrado lo hace por encima y por debajo del único obturador. Por este motivo se emplean en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una alta presión diferencial. En posición de cierre, las fugas a través de la válvula son mayores que en una válvula de simple asiento, debido a que es mecánicamente imposible que el doble obturador asiente perfectamente sobre los dos asientos.

Como dato orientativo, puede señalarse que según la norma ANSI/FCI 70-2-2006, las fugas admisibles son del 0,01% del caudal máximo en la válvula de simple asiento (clase IV metal a metal) y de 0,1% en la válvula de doble asiento (clase III). Asimismo, las válvulas con asiento dotado de anillo de teflón para cierre estanco (clase VI) admiten un caudal de fuga del 0,00001%, o 0,15 a 6,75 ml/minuto de aire o nitrógeno.

8.1.2.1.2 Válvula en ángulo

La *válvula en ángulo* (figura 8.2d) presenta un flujo de salida perpendicular al flujo de entrada con un recorrido menos curvilíneo que en una válvula de globo, por lo que permite obtener un flujo de caudal regular sin excesivas turbulencias y es, además, adecuada para sustituir a una válvula de globo cuando el fluido circula con sólidos en suspensión o a excesiva velocidad provocada por una alta presión diferencial de trabajo.

El diseño de la válvula es idóneo para el control de fluidos que vaporizan (*flashing*), es decir para los fluidos que dentro del estrechamiento existente en las partes internas (entre el obturador y el asiento) y debido a una alta presión diferencial, han aumentado su velocidad y se encuentran a una presión inferior al punto de vaporización. En estas condiciones, el fluido está en estado líquido a la entrada y salida de la válvula y en estado de vapor/líquido dentro de la misma. De este modo, las

burbujas de vapor formadas implosionan (pasando a líquido) y pueden provocar daños mecánicos graves al chocar contra las partes internas o contra el cuerpo de la válvula.

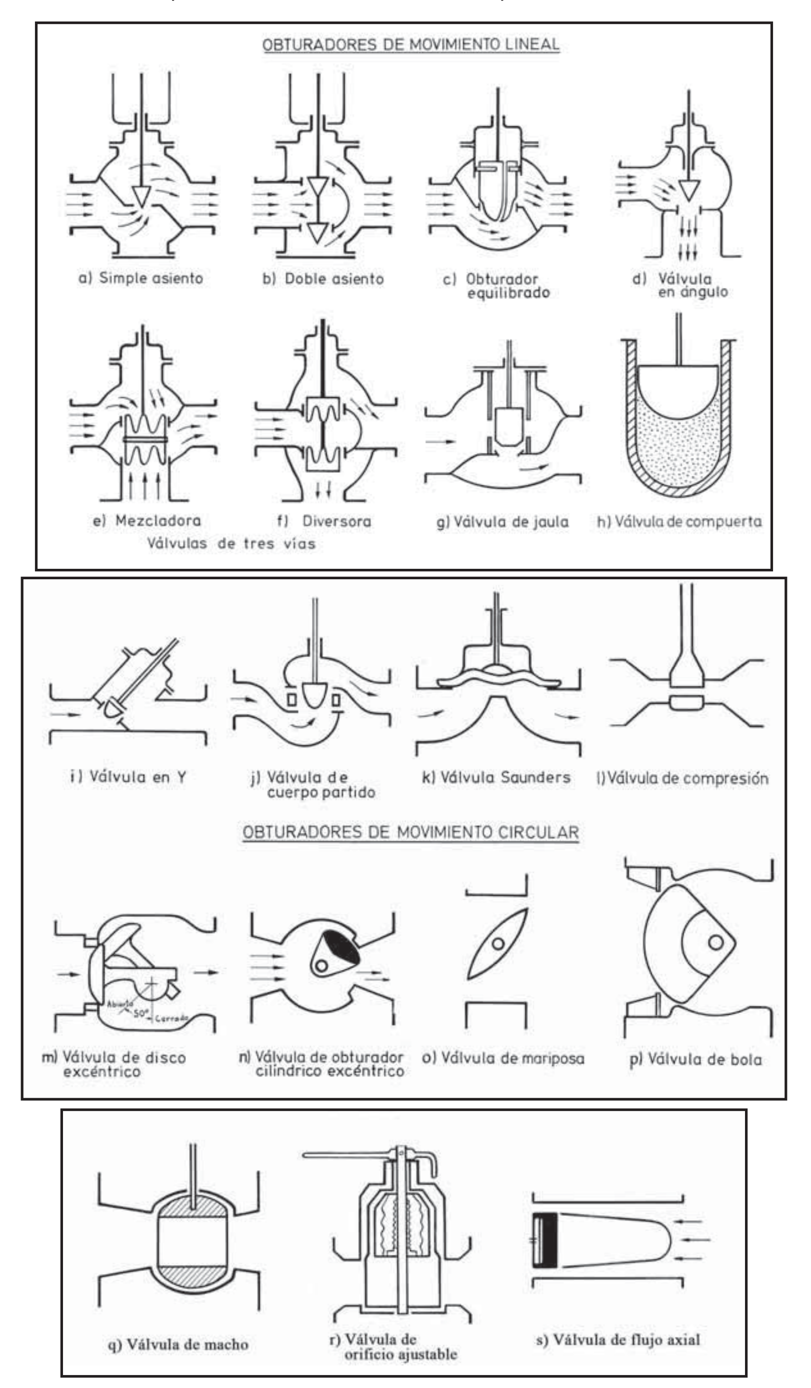


Figura 8.2 Tipos de válvulas de control

8.1.2.1.3 Válvula de tres vías

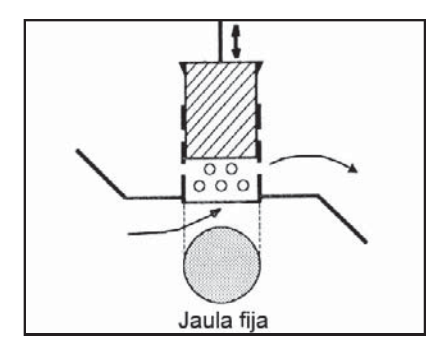
La *válvula de tres vías* se emplea generalmente para mezclar fluidos –válvulas *mezcladoras* (figura 8.2e)– o bien para derivar, de un flujo de entrada, dos de salida –válvulas *diversoras* (figura 8.2f).

Las válvulas de tres vías intervienen típicamente en el control de temperatura de intercambiadores de calor, facilitando un control muy rápido de la temperatura, gracias a que el fluido de calefacción (vapor o fluido térmico) puede derivar, a través de la válvula, sin pasar por el intercambiador.

8.1.2.1.4 Válvula de jaula

La *válvula de jaula* (figura 8.2g y figura 8.3) recibe esta denominación por la forma de jaula que tiene, bien con los orificios dispuestos en una jaula fija en cuyo interior desliza el obturador, en cuyo caso se denomina *válvula de jaula fija* o bien con orificios en el obturador, en cuyo caso se denomina *válvula de jaula móvil*.

Las *válvulas de jaula fija* pueden tener los orificios mecanizados de tal modo que la relación carrera-caudal, obtenida al moverse el obturador, proporciona las características de caudal deseadas. Por otra parte, permiten un fácil desmontaje del obturador y favorecen la estabilidad de funcionamiento al incorporar orificios que permiten eliminar prácticamente el desequilibrio de fuerzas producido por la presión diferencial del fluido. Por este motivo, este tipo de obturador equilibrado, se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una alta presión diferencial.



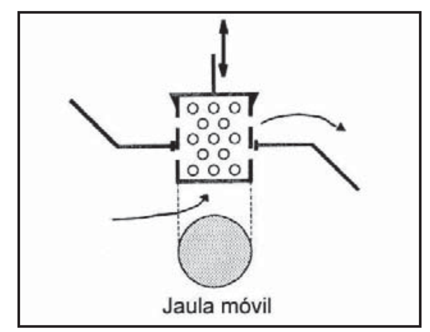


Figura 8.3 Válvulas de jaula

Como el obturador está contenido dentro de la jaula, la válvula es muy resistente a las vibraciones y al desgaste. Por otro lado, el obturador puede disponer de aros grafitados que asientan contra la jaula y permiten lograr un cierre estanco. Sin embargo, no es la válvula adecuada cuando el fluido es pegajoso, viscoso o contiene sólidos en suspensión, ya que entonces el fluido tiende a colocarse entre el obturador y la jaula y puede dar lugar a obstrucciones y agarrotamientos.

8.1.2.1.5 Válvula de compuerta

Esta válvula (figura 8.2h), denominada también válvula de tajadera, efectúa su cierre con un disco vertical plano, o de forma especial, y que se mueve verticalmente al flujo del fluido.

Por su disposición es adecuada generalmente para control todo-nada, ya que en posiciones intermedias tiende a bloquearse. Tiene la ventaja de presentar muy poca resistencia al flujo de fluido cuando está en posición de apertura total y, por lo tanto, se caracteriza por una baja caída de presión.

8.1.2.1.6 Válvula en Y

La *válvula en Y* (figura 8.2i) tiene el asiento y el obturador inclinados 45° respecto al flujo del fluido. Si el cuerpo está instalado en horizontal, es difícil desmontar las partes internas inclinadas 45° con relación a la horizontal. Es adecuada como válvula de cierre y de control. Como válvula todo-nada se caracteriza por su baja pérdida de carga y como válvula de control presenta una gran capacidad de caudal.

Posee una característica de autodrenaje cuando está inclinada con un cierto ángulo. Se emplea usualmente en instalaciones criogénicas.

8.1.2.1.7 Válvula de cuerpo partido

Esta válvula (figura 8.2j) es una modificación de la válvula de globo de simple asiento teniendo el cuerpo partido en dos partes entre las cuales está presionado el asiento.

Esta disposición permite una fácil sustitución del asiento y facilita un flujo suave del fluido sin espacios muertos en el cuerpo. Se emplea principalmente para fluidos viscosos y en la industria alimentarla.

8.1.2.1.8 Válvula Saunders

En la válvula *Saunders* o de *diafragma* (figura 8.2k) el obturador es una membrana flexible que, a través de un vástago unido a un servomotor, es forzada contra un resalte del cuerpo, que actúa de asiento, cerrando así el paso del fluido. La válvula se caracteriza porque el cuerpo puede revestirse fácilmente de goma o de plástico para trabajar con fluidos agresivos. Tiene la desventaja de que el servomotor de accionamiento debe ser muy potente.

Se utiliza principalmente en procesos químicos difíciles, en particular en el manejo de fluidos negros o agresivos o bien en el control de fluidos conteniendo sólidos en suspensión.

8.1.2.1.9 Válvula de manguito

La *válvula de manguito*, que puede verse en la figura 8.2l, funciona mediante el pinzamiento de dos o más elementos flexibles, por ejemplo un tubo de goma. Igual que las válvulas Saunders o de diafragma, se caracteriza porque proporciona un óptimo control en posición de cierre parcial y se aplica, fundamentalmente, en el manejo de fluidos negros corrosivos, viscosos o conteniendo partículas sólidas en suspensión.

8.1.2.2 Válvulas con obturador de movimiento rotativo

Las válvulas en las que el obturador tiene un *movimiento rotativo* se clasifican en: válvula de disco excéntrico rotativo (*Camflex*), válvula de obturador cilíndrico excéntrico, válvula de mariposa, válvula de bola, válvula de macho, válvula de orificio ajustable y válvula de flujo axial.

8.1.2.2.1 Válvula de disco excéntrico (Camflex)

La *válvula de disco excéntrico (Camflex)* (figura 8.2m y 8.4) consiste en un obturador de superficie segmentada esférica que se autoalinea durante el movimiento de giro excéntrico, proporcionando un cierre estanco y unas bajas fuerzas dinámicas del fluido. Esto permite utilizar un servomotor de par reducido. Por otra parte, la tapa de extensión permite la operación para un margen amplio de temperaturas.

La válvula puede tener un cierre estanco mediante aros de teflón dispuestos en el asiento y se caracteriza por su gran capacidad de caudal, comparable a las válvulas de mariposa y a las de bola.

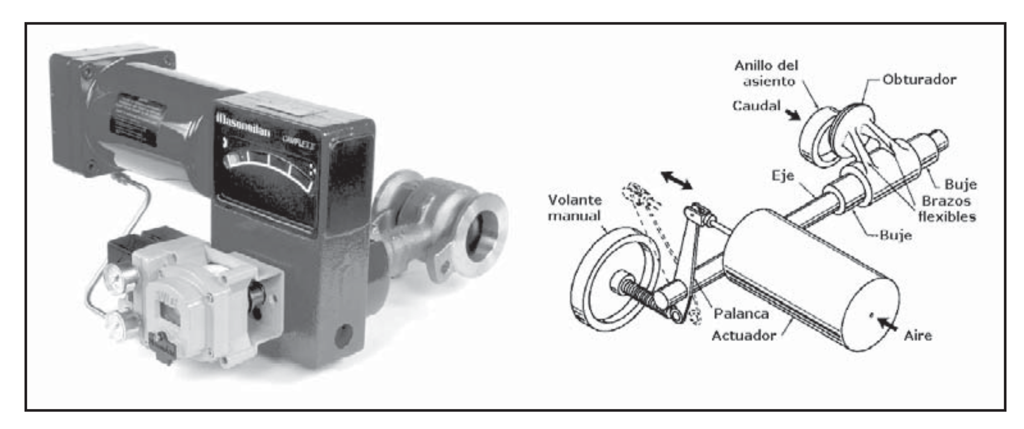


Figura 8.4 Válvula Camflex. Fuente: Masoneilan (Dresser)

8.1.2.2.2 Válvula de obturador cilíndrico excéntrico

Esta válvula (figura 8.2n) tiene un obturador cilíndrico excéntrico que asienta contra un cuerpo cilíndrico. El cierre hermético se consigue con un revestimiento de goma o de teflón en la cara del cuerpo donde asienta el obturador.

La válvula es de bajo coste y es adecuada para fluidos corrosivos o conteniendo sólidos en suspensión.

8.1.2.2.3 Válvula de mariposa

En la *válvula de mariposa* (figura 8.2o) el cuerpo está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular. La válvula puede cerrar herméticamente mediante un anillo de goma encastrado en el cuerpo.

Un servomotor exterior acciona el eje de giro del disco y ejerce su par máximo cuando la válvula está casi cerrada (en control todo-nada se consideran 90° y en control continuo 60°, a partir de la posición de cierre, ya que la última parte del giro es bastante inestable), siempre que la presión diferencial permanezca constante. En la selección de la válvula es importante considerar las presiones diferenciales correspondientes a las posiciones de completa apertura y de cierre; se necesita una fuerza grande del actuador para accionar la válvula en caso de una caída de presión elevada.

Las válvulas de mariposa se emplean para el control de grandes caudales de fluidos a baja presión.

8.1.2.2.4 Válvula de bola

En estas válvulas, el cuerpo tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma de esfera o de bola (de ahí su nombre). La bola tiene un corte adecuado (usualmente en V) que fija la curva característica de la válvula, y gira transversalmente accionada por un servomotor exterior. El cierre estanco se logra con un aro de teflón incorporado al cuerpo contra el cual asienta la bola cuando la válvula está cerrada. En posición de apertura total, la válvula equivale aproximadamente al 75% del tamaño de la tubería. La válvula de bola se emplea principalmente en el control de caudal de fluidos negros, o bien en fluidos con gran porcentaje de sólidos en suspensión.

El tipo más común de las válvulas de bola es la válvula de bola segmentada, llamada así por la forma de segmento esférico del obturador (figura 8.2p).

8.1.2.2.5 Válvula de macho

Es una válvula de bola típica (figura 8.2q) que consiste en un macho u obturador de forma cilíndrica o troncocónica con un orificio transversal igual al diámetro interior de la tubería. El macho ajusta en el cuerpo de la válvula y tiene un movimiento de giro de 90°.

Se utiliza generalmente en el control manual todo-nada de líquidos o gases y en regulación de caudal.

8.1.2.2.6 Válvula de orificio ajustable

En la *válvula de orificio ajustable* el obturador consiste en una camisa de forma cilíndrica que está perforada con dos orificios, uno de entrada y otro de salida, y que gira mediante una palanca exterior accionada manualmente o por medio de un servomotor. El giro del obturador tapa, parcial o totalmente, las entradas y salidas de la válvula, controlando así el caudal. La válvula incorpora, además, una tajadera cilíndrica que puede deslizar dentro de la camisa gracias a un macho roscado de accionamiento exterior. Así, la tajadera puede fijarse manualmente en una posición determinada para limitar el caudal máximo (figura 8.2r).

La válvula es adecuada en los casos en que es necesario ajustar manualmente el caudal máximo del fluido, cuando el caudal puede variar entre límites amplios de forma intermitente o continua y cuando no se requiere un cierre estanco. Se utiliza para combustibles gaseosos o líquidos, vapor, aire comprimido y líquidos en general.

8.1.2.2.7 Válvula de flujo axial

Las *válvulas de flujo axial* consisten en un diafragma accionado neumáticamente que mueve un pistón, el cual, a su vez, comprime un fluido hidráulico contra un obturador formado por un material elastómero. De este modo, el obturador se expansiona para cerrar el flujo anular del fluido. Este tipo de válvulas se emplea para gases y es especialmente silencioso. Otra variedad de la válvula de flujo axial es la válvula de manguito, que es accionada por compresión exterior del manguito a través de un fluido auxiliar a una presión superior a la del propio fluido. Se utiliza también para gases (ver figura 8.2s).

Obturador movimiento lineal		Obturador movimiento rotativo		
Globo	**Jaula**	**Bola**	**Camflex**	**Mariposa**
Cierre estanco	Cierre no estanco	Mayor rangeabilidad	Buena rangeabilidad	Lineal
Apertura rápida	Apertura rápida	Cierre estanco	Característica lineal	Económica
Actuador de mayor tamaño	Resistente a cavitación y poco ruido	Cierre no estanco a Δp	Lechadas de líquidos	Difícil cerrarla a Δp
Menores caudales que la de jaula	Mayores caudales que la de globo	No adecuada para cavitación y ruido	Resistente a cavitación	No adecuada para cavitación y ruido
La dinámica del fluido influye	Menor caudal que la rotativa	Uso limitado en fluidos corrosivos		Mínimo espacio de instalación
Adecuada para fluidos corrosivos o erosivos	Más cara	Buena para sólidos en suspensión y lechadas		
	No adecuada para fluidos sucios	Mayor capacidad que la de globo		

Tabla 8.1 Válvulas con obturador de movimiento lineal y rotativo

En la tabla 8.1 se comparan las válvulas con obturador de movimiento lineal y rotativo más importantes.

8.1.3 Cuerpo de la válvula

El *cuerpo* de la válvula debe resistir la temperatura y la presión del fluido sin pérdidas, tener un tamaño adecuado para el caudal que debe controlar y ser resistente a la erosión o a la corrosión producidas por el fluido.

El cuerpo y las conexiones a la tubería (bridadas o roscadas) están normalizados de acuerdo con las presiones y temperaturas de trabajo en las normas DIN y ANSI, entre otras, según puede verse en la figura 8.5 y 8.6.

Cabe señalar los puntos siguientes:

a) Las conexiones roscadas se utilizan hasta 2".
b) Las bridas pueden ser planas, con resalte, machihembradas y machihembradas con junta de teflón.
c) Las conexiones soldadas pueden ser con encaje o con soldadura a tope. Las primeras se emplean para tamaños de válvulas hasta 2", y las segundas desde 2 ½" a tamaños mayores.

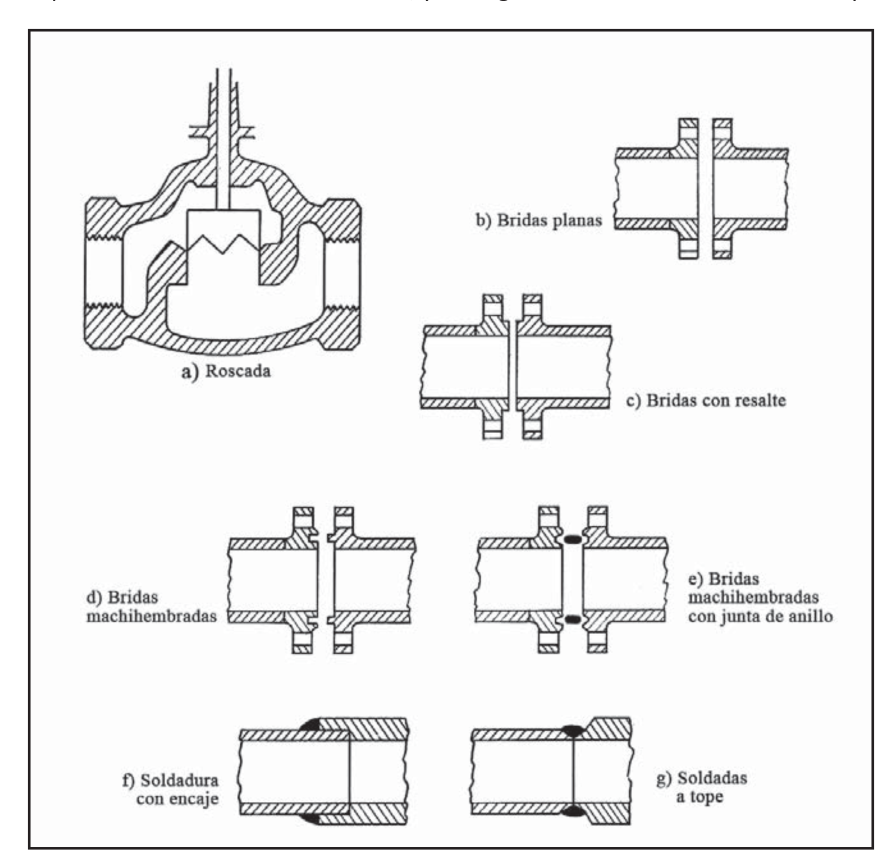


Figura 8.5 Tipos de conexiones del cuerpo a la tubería

El cuerpo suele ser de hierro, acero y acero inoxidable y en casos especiales los materiales pueden ser de monel, hastelloy B o C, etc. En las tablas 8.2, 8.3, 8.4 y 8.5 figuran los materiales más empleados con su composición principal.

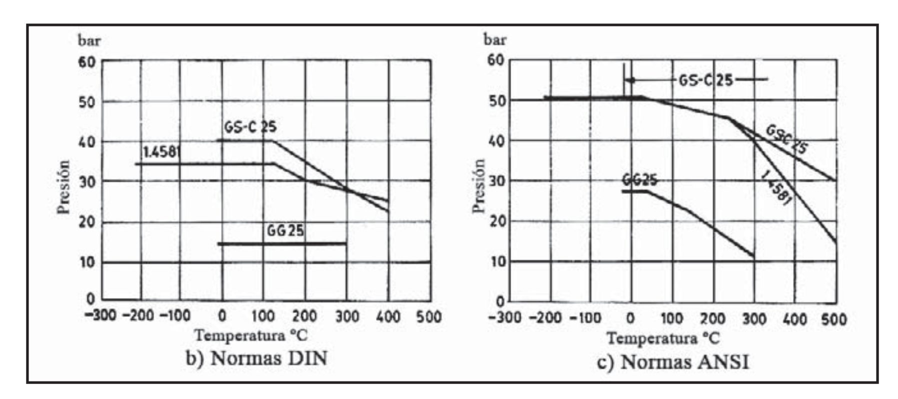


Figura 8.6 *Normas DIN, ANSI de cuerpos de válvulas de control*

Material	Nominal lb	bar a ºC	bar a ºC	Norma ANSI
Bronce	150	10,3 - 208	15,5 - 65	BI 624-1971
	300	20,7 - 216	34,5 - 65	Material ASTM B62
Hierro fundido	125	8,5 - 178	dic-65	B16.1-1975
	250	17 - 207	27 - 65	Material ASTM AI 26

Tabla 8.2 *Cuerpos de bronce e hierro fundido. Fuente: Honeywell*

Tipo	Especificación DIN • ASTM	Composición %								
		C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Cr	Ni	Mo	Otros
Hierro fundido	GG 25									
	A 126-clase B*									
Acero al carbono	GS-C 25	0,25	0,8	0,5	0,05	0,05	3 máx			
	A 216-WCB*	0,3	1,0	0,6	0,05	0,06				
Acero inox. 18/8/3	1.4581	0,08	1,5	1,5	0,05	0,03	17-19,5	10,5-12,5	2-2,5	Nb>8×%C
	A 351-CF 10 Mc*	0,10	1,5	1,5	0,04	0,04	15-18	13-16	1,75-2,5	Nb>10×%C 1,2 % máx.

Tabla 8.3 *Materiales estándar para el cuerpo de la válvula. Fuente: Honeywell*

En aplicaciones químicas hasta 140 °C y 10 bar, son de elección las válvulas termoplásticas, en particular por su resistencia a la corrosión, abrasión y congelación, por su alta pureza y por su bajo coste. No son adecuadas en casos de fuerte vibración o en ambientes con posible abuso mecánico.

Tipo	*Especificación DIN * ASTM*	*Composición %*								
		C máx.	*Mn máx.*	*Si máx.*	*P máx.*	*S máx.*	*Cr*	*Ni*	*Mo*	*Otros*
Acero CrMo	7357	0,20	0,8	0,5	0,04	0,04	1-1,5		0,45-0,55	
	A 217-WC 6*	0,20	0,8	0,6	0,05	0,06	1-1,5		0,45-0,65	
Acero CrMo 5 %	7362	0,12	0,5	0,4	0,04	0,04	4-6,5		0,45-0,65	
	A 217-C 5*	0,20	0,7	0,75	0,05	0,06	4-6,5		0,45-0,65	
Acero Ni 3,5 %	5638	0,12	0,8	0,5	0,025	0,025		3,3-3,8		
	A 352-LC 3*	0,15	0,8	0,6		0,05		3-4		
Inox. 18/8	4552	0,10	2	1,5	0,04	0,04	17,5-20	9-11		Nb>8×%C
	A 351-CF 8 C*	0,08	1,5	2	0,04	0,04	18-21	9-12		Nb>10×%C 1,2 % máx.
Inox. 18/8	4308	0,08	2	2	0,04	0,04	17,5-20	9-11		
	A 351-CF 8*	0,08	1,5	2	0,04	0,04	18-21	8-11		
Acero LC	4404	0,03	2	1	0,04	0,04	16,5-18,5	11-13	2-2,5	
	A 351-CF 3 M*	0,03	1,5	1,5	0,04	0,04	17-21	9-13	2-3	
Hastelloy B	Euzonit 70	0,03						62-65	28-32	Fe 1 máx.
	Hastelloy B	0,05						62-65	26-30	Fe 4-7 Co 2,5
Hastelloy C	Euzonit 60	0,02					17	60	20	Fe 1 máx.
	Hastelloy C	0,08					15-17	54	15-17	Fe 7 W 3-4,5 Co 2,5 V 0,35
Monel	G-NiCu30Si2	0,35	1,5	2				62-68		Cu 26-33 Fe 2,5
	Monel	0,3	1,5	1,5				62-68		Cu 28-32 Fe 3
Bronce (Olkusil)	G-CuZn16Si4									Cu 80 Si 4 Zn 16
	B 198-13 B									Cu 80 Si 4 Zn 16

Tabla 8.4 Materiales especiales para el cuerpo de la válvula

8.1.4 Tapa de la válvula o casquete

La *tapa de la válvula* de control tiene por objeto unir el cuerpo al servomotor. A su través desliza el vástago del obturador accionado por el motor. Este vástago dispone, generalmente, de un índice que señala en una escala la posición de apertura o de cierre de la válvula.

Para que el fluido no se escape a través de la tapa es necesario disponer una caja de empaquetadura entre la tapa y el vástago. La empaquetadura ideal debe ser elástica, tener un bajo coeficiente de

rozamiento, ser químicamente inerte y buen aislante eléctrico, con el fin de no formar un puente galvánico con el vástago que dé lugar a una corrosión de partes de la válvula.

Tipo	*Resistencia a la tensión*	*Resistencia a la flexión*	*Resistencia a compresión*	*Dureza Rockwell*	*Temperatura máxima (° C)*	*Presión máx (bar)*
Cloruro Polivinilo (PVC)	480	1030	890	115	77	10
Cloruro Polivinilo Clorinado (CPVC)	620	1100	1030	118	107	10
Polipropileno (PP)	340	620	620	95	107	10
Polipropileno fibra vidrio (PPG)	690	—	—	107	122	10
Fluoruro Polivinilideno (PVDF)	510	960	960	110	137	10

Tabla 8.5 Materiales termoplásticos para el cuerpo de la válvula. Fuente: Masoneilan

La empaquetadura que se utiliza normalmente es de teflón cuya temperatura máxima de servicio es de 220 °C. A temperaturas superiores o inferiores a este valor es necesario, o bien emplear otro material (grafito puro, etc.) o bien alejar la empaquetadura del cuerpo de la válvula para que se establezca así un gradiente de temperaturas entre el fluido y la estopada, y esta última pueda trabajar satisfactoriamente.

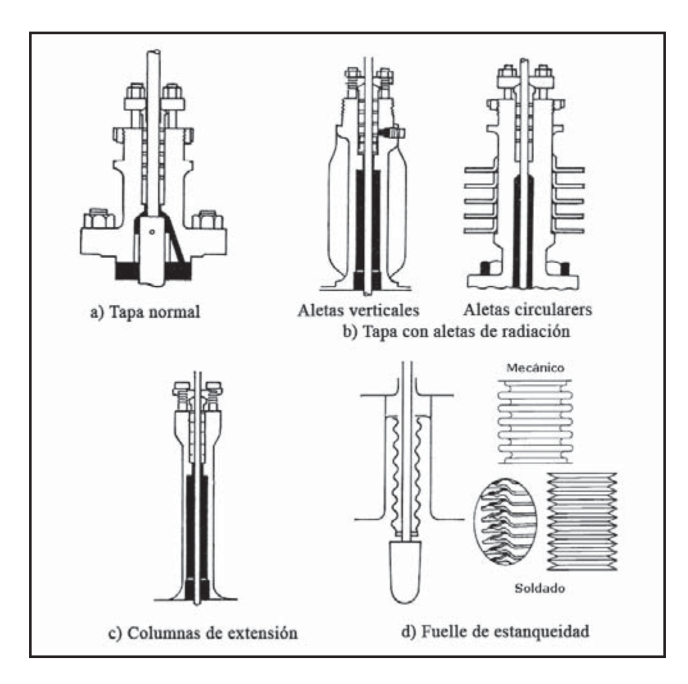


Figura 8.7 Tipos de tapas

La empaquetadura normal no proporciona un sello perfecto para el fluido. En el caso de fluidos corrosivos, tóxicos, radiactivos o muy valiosos hay que asegurar un cierre total en la estopada. Los fuelles de estanqueidad lo proporcionan al estar unidos por un lado al vástago y por el otro a la tapa. La estanqueidad lograda es tan perfecta que las posibles fugas sólo pueden detectarse mediante ensayos realizados con un espectrómetro de masas.

Dependiendo de las temperaturas de trabajo de los fluidos y del grado de estanqueidad deseada existen los siguientes tipos de tapas:

1. Tapa normal (figura 8.7a) adecuada para trabajar a temperaturas del fluido variables entre 0 °C y 220 °C.
2. Tapa con aletas de radiación circulares o verticales (figura 8.7b) que puede trabajar entre -20 °C y 450 °C, recomendándose que, por encima de 350°C, la válvula se monte invertida para evitar el calentamiento por convección de la empaquetadura.
3. Tapa con columnas de extensión (figura 8.7c). Las columnas son adecuadas cuando el fluido está a temperaturas muy bajas. Como guía en su selección se recomiendan las longitudes de la tabla 8.6.
4. Tapa con fuelle de estanqueidad (figura 8.7d) para temperaturas de entre - 20 °C y 450 ° C.

Longitud columnas de extensión		
Tamaño de la válvula en pulgadas	Temperatura de trabajo	
	-21 ºC a -80 ºC	-80 ºC a -150 ºC
1/2 a 2 1/2	400 mm	600 mm
3 a 6	600 mm	800 mm
8 a 12	800 mm	1000 mm

Tabla 8.6 Columnas de extensión (Fuente: Honeywell)

La caja de empaquetaduras de la válvula consiste en unos anillos de estopada comprimidos por medio de una tuerca o bien mediante una brida de presión regulable con dos tuercas. La empaquetadura puede ser apretada manualmente de modo periódico o bien ser presionada elásticamente con un muelle apoyado interiormente en la tapa (figura 8.8).

La empaquetadura normal suele ser de aros de teflón, de sección en V, comprimidos con un resorte con la ventaja de que el teflón es autolubricante y no necesita engrase. Precisa de un vástago muy bien mecanizado (50 a 100 micras rms) para que la empaquetadura de teflón asiente correctamente. Cuando el fluido y las condiciones de servicio no permiten el empleo aislado del teflón se utiliza grafito en forma de filamento, laminado y cinta. El grafito sustituyó al amianto que fue dejado de utilizar por cuestiones de salud humana. El grafito tiene un coeficiente de dilatación semejante al metal del vástago, de modo que el choque térmico no es un problema. Su coeficiente de rozamiento es del orden de 7 a 10 veces mayor que el del teflón, por lo que siempre que sea posible debe emplearse éste. No debe permitirse que se inicie una fuga porque es difícil solucionarla después. El grafito, en presencia de humedad, puede dar lugar a una severa corrosión galvánica del vástago, con lo que pueden presentarse fugas a largo plazo. En los casos en que el fluido es tan tóxico que debe impedirse su fuga a través de la estopada y por alguna razón no pueden emplearse los fuelles de estanqueidad, se utilizan empaquetaduras dobles con dos collarines de lubricación.

Esta disposición permite la inyección de gas inerte o líquido (*flashing*). Incluso, si partes pequeñas del fluido fugan, pueden recuperarse por succión a través de dichos collarines.

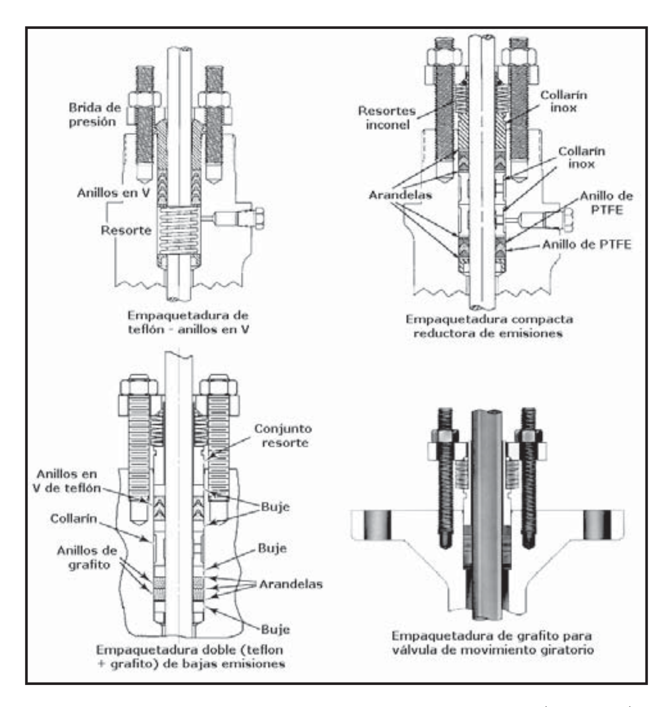


Figura 8.8 *Tipos de empaquetaduras. Fuente: Fisher (Emerson)*

Existen diversos tipos de empaquetaduras en función de la presión, temperatura de trabajo y el tipo de fluido. En la tabla 8.7 puede verse una guía de selección.

Tipos de empaquetaduras							
	Descripción	**Presión máxima (bar)**	**Temperatura máxima**	**Índice de la empaqueta dura**	**Índice de vida útil**	**Rozamiento de la empaquetadura**	**Observaciones**
Obturador de movimiento lineal	Teflón en V	20	-18 ºC a 93 ºC	Mejor	Muy larga	Muy bajo	Adecuado en general para todo tipo de productos. Inadecuado para aceite o para productos que precipitan cristales o que contienen fangos o en la industria nuclear.
	Compacta reductora de emisiones	–	-46 ºC a 232 ºC	Superior	Muy larga	Bajo	Bajo nivel de fuga, bajo rozamiento, bajo mantenimiento
	Doble (teflón + grafito) de bajas emisiones	–	-46 ºC a 232 ºC	Superior	Muy larga	Bajo	Adecuado para la industria nuclear y para fluidos no oxidantes
Obturador de movimiento rotativo	Teflón en V	103	-46 ºC a 232 ºC	Superior	Muy larga	Bajo	Adecuado en general para todo tipo de productos. Inadecuado para aceite o para productos que precipitan cristales o que contienen fangos o en la industria nuclear.
	Grafito para válvula movimiento rotativo	103	-18 ºC a 315 ºC	Superior	Muy larga	Moderado	Adecuado para la industria nuclear y para fluidos no oxidantes

Tabla 8.7 *Tipos de empaquetaduras. Fuente: Fisher (Emerson)*

Las empaquetaduras con engrase están dejando de utilizarse por precisar de una válvula de engrase que periódicamente debe vigilarse para eliminar posibles fugas de producto al exterior.

La *Norma de Aire Limpio* (*Clean Air Act*) de 24 de febrero de 2004 limita las emisiones a la atmósfera de fluidos químicos orgánicos volátiles. Su observancia ha conducido, a los fabricantes de válvulas de control, a rediseñar las empaquetaduras del vástago, que son la causa principal de las emisiones que se producen. Se han mejorado los materiales obteniendo una vida útil más larga sin degradación de la empaquetadura, y se ha conseguido un menor rozamiento con lo que no ha sido necesario pensar en aumentar el tamaño del actuador como en algunas aplicaciones de válvulas normales.

Las fugas en las empaquetaduras más usuales (aros de teflón en V, etc.) se deben a la pérdida de la carga axial debida al desgaste y al choque térmico por los diferentes coeficientes de dilatación del acero del vástago y del material de la empaquetadura (el teflón 10 veces más que el acero). En las válvulas normales, la carga axial se mantiene apretando periódicamente la empaquetadura, lo que, aparte de un mantenimiento más caro, comporta un mayor rozamiento de la estopada, con el correspondiente aumento de la histéresis y de la zona muerta de la válvula y un empeoramiento del control. Los nuevos sistemas de estopadas contienen aros de perfluoroelastómero (PFE) alternando con aros de teflón rellenos con fibras de grafito. Mientras que la estopada clásica de aros de teflón muestra fugas mayores de 500 ppm después de ser sometida a 10.000-40.000 ciclos, la nueva estopada después de 250.000 ciclos (3 años de funcionamiento) se mantiene todavía muy por debajo de las 500 ppm.

Las normas que se utilizan para comprobar las fugas en la empaquetadura de las válvulas son ISO 15848, ANSI/FCI 91-1 y VDI 2440. Los fluidos elegidos para comprobar las fugas son el helio en Europa y el metano en América. El comité de válvulas de control IEC SC 65BWG9 recomienda someter la válvula de control a ensayos en el punto medio de la carrera, lo que es más representativo de la operación de la válvula y que proporciona un mayor número de ciclos que en la válvula todo-nada que sólo abre y cierra. En la tabla 8.8 puede verse una comparación de los métodos de valoración de las fugas de la estopada de las válvulas de control.

Normas	ISO 15848	ANSI/FCI 91-1	VDI 2440
Fluido de ensayo	He o CH_4	CH_4 (N_2)	He
Método de detección	global	Sniffing EPA 21	global
Tasa de fugas	10-6 $mg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$	500 ppmv	10^{-4} $mbar \cdot l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ($1.76 \cdot 10^{-5}$ $mg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)
	10-4 $mg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$	100 ppmv	10^{-2} $mbar \cdot l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ($1.76 \cdot 10^{-3}$ $mg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)
	10-3 $mg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$		Temperatura > 250 °C
Carrera de la válvula	100% para válvula todo-nada	100%	Sin especificar
	±10% para válvula de control		
Número de ciclos	20.000, 60.000, 100.000	5.000, 25.000,100.000	Sin especificar

Tabla 8.8 *Normas de detección de fugas en válvulas de control. Fuente: Fisher (Emerson)*

El mantenimiento normal de las válvulas con empaquetadura estándar consiste en inspecciones periódicas y en un programa activo de mantenimiento de las válvulas que manejan fluidos orgánicos volátiles. Con las nuevas empaquetaduras, si se llega como máximo a fugas mayores de 500 ppm

en sólo el 0,5% de las válvulas de la planta, la Norma de Aire Limpio permite efectuar únicamente inspecciones anuales.

8.1.5 Partes internas de la válvula. Obturador y asientos

8.1.5.1 Generalidades

Como *partes internas* de la válvula se consideran las piezas internas desmontables que están en contacto directo con el fluido. Estas piezas son el vástago, la empaquetadura, el collarín de lubricación en la empaquetadura (si se emplea), los anillos de guía del vástago, el *obturador* y el *asiento* o los asientos. Hay que señalar que el obturador y el asiento son los encargados de controlar el caudal gracias al orificio de paso variable que forman cuando varía su posición relativa, y que además tienen la misión de cerrar el paso del fluido.

En la selección del obturador y los asientos intervienen tres puntos principales:

1. Materiales normales y los especiales aptos para contrarrestar la corrosión, la erosión y el desgaste producidos por el fluido.
2. Características de caudal en función de la carrera.
3. Tamaño normal o reducido que permite obtener varias capacidades de caudal de la válvula con el mismo tamaño del cuerpo.

8.1.5.2 Materiales

El obturador y los asientos se fabrican, normalmente, en acero inoxidable porque este material es muy resistente a la corrosión y a la erosión del fluido. Cuando la velocidad del fluido es baja, pueden utilizarse PVC, fluorocarbonos y otros materiales blandos, solos o reforzados con fibras de vidrio o grafito. En algunas válvulas pueden utilizarse obturadores y asientos de cerámica. En las tablas 8.9 y 8.10 figuran los materiales utilizados en los obturadores y asientos.

Límites de temperatura de materiales de partes internas		
Material	**Aplicaciones**	**Límites de temperatura**
304 SST, S30400, CF8	obturadores y asientos sin revestimiento	−268 ºC a 316 ºC
316 SST, S31600, CF8M	obturadores y asientos sin revestimiento	−268 ºC a 316 ºC
317 SST, S31700, CG8M	obturadores y asientos sin revestimiento	−268 ºC a 316 ºC
416 SST, S41600, 38 HRC min	jaulas, obturadores y asientos	−29 ºC a 427 ºC
CA6NM, 32 HRC min	jaulas, obturadores y asientos	−29 ºC a 482 ºC
Nitronic 50(1), S20910 alta resistencia	ejes, vástagos y pernos	−198 ºC a 593 ºC
440 SST, S44004	bujes, obturadores y asientos	−29 ºC a 427 ºC
17−4 PH, S17400, CB7Cu−1, H1075	jaulas, obturadores y asientos	−62 ºC a 427 ºC
Aleación 6, R30006, CoCr−A	obturadores y asientos	−198 ºC a 816 ºC
Recubrimiento autocatalítico de níquel	revestimiento partes internas	−198 ºC a 400 ºC
Cromado galvánico	revestimiento partes internas	−198 ºC a 316 ºC
Cromado galvánico en el obturador de bola en V	revestimiento partes internas	−198 ºC a 427 ºC
Revestimiento de cromo	revestimiento partes internas	−198 ºC a 593 ºC
Monel (2) K500, N05500	obturadores y asientos sin revestimiento	−198 ºC a 427 ºC
Monel (2) 400, N04400	obturadores y asientos sin revestimiento	−198 ºC a 427 ºC
Hastelloy (3) B2, N10665, N7M	obturadores y asientos sin revestimiento	−198 ºC a 427 ºC

Tabla 8.9 Materiales en las partes internas y límites de temperatura. Fuente: Fisher (Emerson)

Hastelloy (3) C276, N10276, CW2M	obturadores y asientos sin revestimiento	−198 ºC a 427 ºC
Titanio Grados 2, 3, 4, C2, C3, C4	obturadores y asientos sin revestimiento	−59 ºC a 316 ºC
Níquel, N02200, CZ100	obturadores y asientos sin revestimiento	−198 ºC a 316 ºC
Aleación 20, N08020, CN7M	obturadores y asientos sin revestimiento	−198 ºC a 316 ºC
NBR, caucho de nitrilo	asientos	−29 ºC a 93 ºC
FKM Fluoroelastómero (Viton®(4))	asientos	−18 ºC a 204 ºC
PTFE, politetrafluoroetileno	asientos	−268 ºC a 232 ºC
PA (nylon)	asientos	−51 ºC a 93 ºC
HDPE, polietileno de alta densidad	asientos	−54 ºC a 85 ºC
CR, cloropreno (Neopreno(2))	asientos	−40 ºC a 82 ºC
1. Marca registrada de Armsco teel Corp. 2. Monel e Inconel son marcas registradas de Special Metals Corp. 3. Hastelloy es una marca registrada de Haynes International 4. Marca registrada de DuPont Performance Elastomers		

Tabla 8.9 final Materiales en las partes internas y límites de temperatura. Fuente: Fisher (Emerson)

8.1.6 Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales

No existe, actualmente, ningún material que resista la *corrosión* de todos los fluidos, por lo cual, en muchos casos, es necesario utilizar materiales combinados cuya selección dependerá del medio específico donde deban trabajar.

La tabla 8.10 permite seleccionar los materiales resistentes a la corrosión, debiendo señalar que sólo constituye una guía sin ser una recomendación exacta, ya que la gran variedad de condiciones de servicio puede alterar las características de resistencia del material.

Realmente, la selección particular de un material específico dependerá de las pruebas experimentales a que se someta en el proceso.

Cuando el material resistente a la corrosión es caro o no adecuado, pueden utilizarse materiales de revestimiento, tales como plásticos, fluorocarbonos, elastómeros, vidrio, plomo y tantalio. Como es lógico, el revestimiento no debe fallar pues el fluido atacaría el metal base y la válvula se perforaría.

Los materiales termoplásticos son resistentes a la corrosión frente a muchos materiales químicos (ácido sulfúrico, ácido nítrico, etc.) y poseen unas buenas características dieléctricas (de 0,9 a 1,18 kV/m con el ensayo ASTM D149).

No resisten las vibraciones mecánicas pero pueden ser el material idóneo de recubrimiento de metales para manejar las dos condiciones, corrosión y vibraciones. En la tabla 8.11 pueden verse sus características.

La erosión se produce cuando partículas, a alta velocidad en el seno del fluido, chocan contra la superficie del material de la válvula. Estas condiciones se encuentran en la vaporización de un líquido (*flashing*), con arena, fangos, etc., y en la cavitación, es decir, la formación continua de burbujas de vapor y su implosión a líquido a la salida de la válvula, en la zona de vena contraída, cuando la tensión de vapor del líquido llega a ser inferior a la presión del vapor saturado.

La posible presencia del fenómeno de la erosión, ante el gran número de fluidos y la gran variedad de condiciones de servicio que se encuentran actualmente en la industria, obliga a seleccionar el tipo y material del cuerpo y del obturador a fin de resistirla, en particular en condiciones extremas de presión diferencial y de temperatura.

Corrosión de metales en contacto con fluidos a temperatura ambiente																
A = material adecuado; B = corrosión de pequeña a moderada. Utilizar con precaución; C = insatisfactorio																
Fluido	**Aluminio**	**Latón**	**Hierro fundido y Acero**	**416 & 440C**	**17–4 inox**	**304 inox**	**316 inox**	**Duplex inox**	**254 SMO**	**Aleación 20**	**Aleación 400**	**Aleación C276**	**Aleación B2**	**Aleación 6**	**Titanio**	**Zirconio**
Aceite vegetal del algodón	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Aceites de petróleo refinados	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Acetaldehído	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Acetato sódico	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Acetileno	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Acetona	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Acido acético con aire	C	C	C	C	B	B	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A
Acido acético libre de aire	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Acido benzoico	A	A	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Acido bórico	C	B	C	C	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A
Acido carbónico	A	B	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Acido cítrico	B	C	C	C	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Acido crómico	C	C	C	C	C	C	C	B	A	C	C	A	B	C	A	A
Acido de horno de coque	C	B	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A
Acido esteárico	C	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A
Acido fórmico	B	C	C	C	C	C	B	A	A	A	C	A	B	B	C	A
Acido fosfórico (aireado)	C	C	C	C	B	A	A	A	A	A	C	A	A	A	C	A
Acido fosfórico (con aire)	C	C	C	C	B	B	B	A	A	A	B	A	A	B	C	A
Acido hidroclórico (aireado)	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	A	C	C	A
Acido hidroclórico (sin aire)	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	A	C	C	A
Acido hidrofluórico (aireado)	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	B	B	C	C	C
Acido hidrofluórico (sin aire)	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	B	B	C	C	C
Acido nítrico	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	C	B	C	C	A	A
Acido oleico	C	C	C	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Acido oxálico	C	C	C	C	B	B	B	A	A	A	B	A	A	B	C	A
Acido pícrico	C	C	C	C	B	B	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A
Acido Sulfúrico (aireado)	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	C	A	A	B	C	A
Acido sulfúrico (sin aire)	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	B	A	A	B	C	A
Acido sulfuroso	C	C	C	C	C	B	B	A	A	A	C	A	A	B	A	A
Agua de mar	C	A	C	C	C	C	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Agua destilada	A	A	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Agua tratada de aminas, agua de caldera de vapor	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	A
Aguarrás	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Alcoholes	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Alquitrán	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Amoníaco	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Tabla 8.10 Materiales resistentes a la corrosión. Fuente: Fisher (Emerson)

Fluido	Aluminio	Latón	Hierro fundido y Acero	416 & 440C	17−4 inox	304 inox	316 inox	Dúplex inox	254 SMO	Aleación 20	Aleación 400	Aleación C276	Aleación B2	Aleación 6	Titanio	Zirconio
Anilina	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	B
Asfalto	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Azufre	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Benceno (Benzol)	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Bromo húmedo	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	C	C	C
Bromo seco	C	C	C	C	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	C	C
Butano	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Carbonato potásico	C	C	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Carbonato sódico	C	C	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Cerveza	A	A	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Cloro húmedo	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	B	B	C	A	A
Cloro seco	C	C	A	C	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	C	A
Cloruro amónico	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A	B	A	A	B	A	A
Cloruro cálcico	C	C	B	C	C	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Cloruro de estaño	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A	C	A	A	B	A	A
Cloruro de etilo	C	B	C	C	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Cloruro de zinc	C	C	C	C	C	C	C	B	B	B	A	A	A	B	A	A
Cloruro férrico	C	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	A	C	C	A	A
Cloruro Potásico	C	C	B	C	C	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Cloruro sódico	C	A	C	C	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Creosota	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Cromato sódico	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Dióxido carbónico húmedo	A	B	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Dióxido carbónico seco	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Dióxido de azufre seco	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A	C	A	A	B	A	A
Disulfuro de carbono	C	C	A	B	B	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A
Dowtherm (fluido térmico)	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Etano	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Éter	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Etilen glicol	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Etileno	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Fluor húmedo	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	B	B	C	C	C
Fluor seco	B	B	A	C	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	C	C
Formaldehido	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Fosfato amónico (Mono−Básico)	B	B	C	B	B	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A
Freón húmedo	C	C	B	C	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Freón seco	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Furfural	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Gas natural	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Gasolina refinada	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Glucosa	A	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A
Hidrógeno	A	A	A	C	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A
Hidróxido amónico	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	B

Tabla 8.10 continuación *Materiales resistentes a la corrosión. Fuente: Fisher (Emerson)*

Frente a la erosión, los materiales termoplásticos tienen el doble de duración que los metálicos en los casos en que el caudal no supera los 3 m/s y el tamaño de las partículas flotantes en el líquido no supera los 300 mesh (tamaño de tamiz de separación de sólidos definido por el número de mallas por pulgada lineal).

Fluido	Aluminio	Latón	Hierro fundido y Acero	416 & 440C	17–4 inox	304 inox	316 inox	Dúplex inox	254 SMO	Aleación 20	Aleación 400	Aleación C276	Aleación B2	Aleación 6	Titanio	Zirconio
Hidróxido magnésico	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Hidróxido potásico	C	C	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Hidróxido sódico	C	C	A	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Hipoclorito cálcico	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	C	A	B	B	A	A
Hipoclorito sódico	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	B	C	A	A
Leche	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Licor negro de sulfato	C	C	A	C	C	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Mercurio	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	C	A
Metanol	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Metil Etil Cetona	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Nitrato amónico	B	C	B	B	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	C	A
Nitrato de plata	C	C	C	C	B	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A
Oxígeno	C	A	C	C	B	B	B	B	B	B	A	B	B	B	C	C
Peróxido de hidrógeno	A	C	C	C	B	A	A	A	A	A	C	A	C	A	A	A
Potasa caústica (ver Hidróxido potásico)																
Propano	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Resina	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Sosa caústica (ver Hidróxido sódico)																
Sulfato Amónico	C	C	C	C	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Sulfato de aluminio	C	C	C	C	B	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A
Sulfato de cobre	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A	C	A	A	C	A	A
Sulfato de zinc	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Sulfuro amónico	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A
Sulfuro de hidrógeno	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Tetracloruro de carbono	A	A	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Tiosulfato sódico	C	C	C	C	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Tricloroetileno	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Trióxido de azufre seco	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A	B	A	A	B	A	A
Vapor	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Vinagre	B	B	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Whiskey y vinos	A	A	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Yodo	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	C	B

Tabla 8.10 final Materiales resistentes a la corrosión. Fuente: Fisher (Emerson)

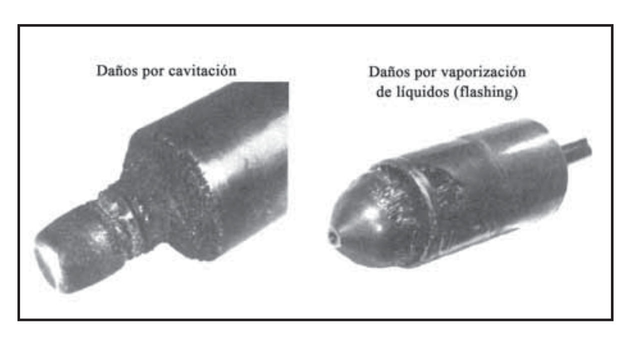


Figura 8.9 Daños por cavitación y flashing

Tipo	Acidos débiles	Acidos fuertes	Acidos oxidantes	Alcalis débiles	Alcalis fuertes	Disolventes orgánicos (100 %)	Disolventes orgánicos	Gas agresivo Cl_2, SO_2
Cloruro Polivinilo (PVC)	√	√	√	√	√	X	√	√
Cloruro Polivinilo Clorinado (CPVC)	√	√	√	√	√	X	√	√
Polipropileno (PP)	√	√	X	√	√	*	√	X – √
Polipropileno fibra vidrio (PPG)	√	√	X	√	*	*	√	X – √
Fluoruro Polivinilideno (PVDF)	√	√	√	√	*	√	√	X – √

√ = Bueno   * = Admisible (alguna influencia en el material)   X = No recomendado

Tabla 8.11 Materiales termoplásticos resistentes a la corrosión

El desgaste por abrasión por día para dos materiales termoplásticos comparado con el hierro fundido es:

Cloruro de Polivinilo (PVC): 0,10 gramos/día, lo que equivale a 0,07 cm/día

Polipropileno (PP): 0,13 gramos/día, lo que equivale a 0,14 cm/día

Hierro fundido: 7,85 gramos/día, lo que equivale a 1,12 cm /día

Figuran, a continuación, en orden decreciente de resistencia a la erosión, los tipos de válvulas más adecuados:

\+

1. Válvula en ángulo de simple asiento, con obturador contorneado-fluido tendiendo a cerrar.
2. Válvula de jaula de cierre estanco.
3. Válvula de globo de simple asiento con obturador contorneado.
4. Válvula de globo de simple asiento con obturador en V.
5. Válvula de jaula equilibrada.
6. Válvula de globo de doble asiento con obturador contorneado.
7. Válvula de globo de doble asiento con obturador en V contorneado.

–

Nótese que la válvula de doble asiento sometida a una alta presión diferencial tiene una velocidad de fuga del fluido elevada cuando está próxima a la posición de cierre, con lo cual los efectos de la erosión son mayores que en la válvula de simple asiento que casi no tiene fugas. Asimismo, un obturador contorneado es más adecuado que uno en V; éste distribuye el flujo de fluido a través de uno o dos de los orificios en V mientras que el primero lo hace alrededor de la periferia del obturador.

La válvula en ángulo es más favorable que la de globo ya que su cuerpo y su obturador no están sometidos a un tan alto grado de variación de recorrido de los filetes de fluido.

El obturador y el asiento son los más castigados por la erosión. Existen materiales especiales que recubren el obturador y el asiento o que los forman totalmente según sea el grado de protección deseado. En la figura 8.10 puede verse el tipo de recubrimiento que se les aplica y en la tabla 8.12 los códigos de la norma API 600.

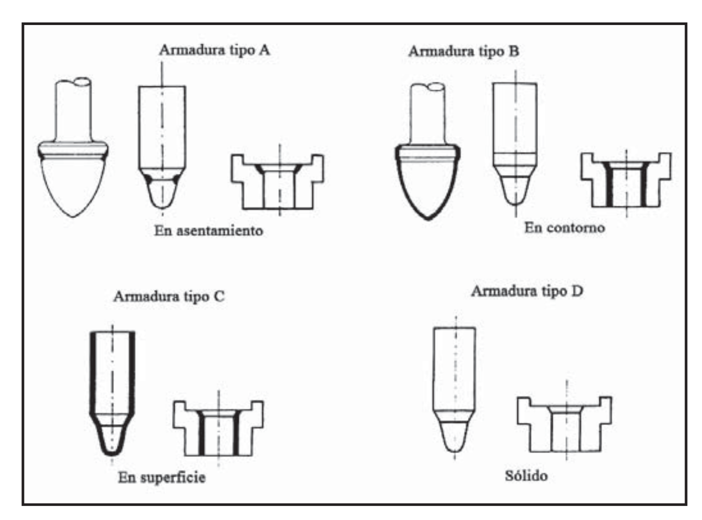


Figura 8.10 Tipos de endurecimiento del obturador y asiento (resistencia a la erosión)

Partes internas (Trim) de las válvulas resistentes a la corrosión (API 600)					
Disco del asiento en el cuerpo de la válvula: Roscado desmontable; Soldado; Integral (utilizado cuando el material de las partes internas es el mismo que el del cuerpo de la válvula)					
Código	**Material**	**Asiento**	**Obturador**	**Disco del asiento**	**Vástago y otras partes internas**
1	410	410	410	410	410
2	304	304	304	304	304
3	F310	310	310	310	310
4	410 endurecido	410 endurecido	410 endurecido	410	410
5	Endurecido	Stellite	Stellite	410	410
5A	Endurecido	Ni-Cr	Ni-Cr	410	410
6	410 y Cu-Ni	Cu-Ni	410	410	410
7	410 y 410 endurecido	410 endurecido	304 endurecido	410	410
8	410 y Endurecido	Stellite	410	410	410
8A	410 y Endurecido	Ni-Cr	410	410	410
9	Monel	Monel	Monel	Monel	Monel
10	316	316	316	316	316
11	Monel y Endurecido	Stellite	Monel	Monel	Monel
12	316 y Endurecido	Stellite	316	316	316
13	Aleación 20	Aleación 20	Aleación 20	Aleación 20	Aleación 20
14	Aleación 20 y Endurecido	Stellite	Aleación 20	Aleación 20	Aleación 20
15	304 y Endurecido	Stellite	Stellite	304	304
16	316 y Endurecido	Stellite	Stellite	316	316
17	347 y Endurecido	Stellite	Stellite	347	347
18	Aleación 20 y Endurecido	Stellite	Stellite	Aleación 20	Aleación 20

Tabla 8.12 Materiales especiales de partes internas resistentes a la erosión (fuente: API 600)

La comprobación de las partes internas de la válvula se realiza mediante los siguientes procedimientos:

- Inspección visual.
- Examen superficial de partículas magnéticas. Se hace circular una corriente continua a través de la pieza para inducir un campo magnético en la misma. Los defectos superficiales o próximos a la superficie de la pieza distorsionan el campo magnético, formándose un campo magnético secundario a través del defecto. Si en estas condiciones se extiende un polvo magnético (seco o suspendido en un líquido) se hacen visibles los defectos en la pieza.
- Líquido penetrante superficial. Se limpia y seca la superficie de la pieza. El líquido colorante se aplica mediante cuchara, cepillo o por aspersión y se retira el exceso. Se seca de nuevo la superficie y se aplica un producto desarrollador (líquido o polvo) y se examina la pieza con luz adecuada (ultravioleta o negra).
- Examen radiográfico. La radiografía (rayos X o rayos gamma) revela las variaciones de densidad del material y, por lo tanto, los defectos. Se compara la radiografía de la pieza con las de placas planas de espesor conocido, perforadas con orificios de diámetro también conocido.
- Examen por ultrasonidos. Puede detectar materiales extraños y discontinuidades en la pieza.

8.1.7 Características de la válvula

El obturador determina la *característica de caudal de la válvula*, es decir, la relación que existe entre la carrera del obturador y el caudal de paso del fluido.

8.1.7.1 Características de caudal inherente

La característica de un fluido incompresible fluyendo en condiciones de presión diferencial constante a través de la válvula se denomina *característica de caudal inherente* y se representa, usualmente, considerando como abscisas la carrera del obturador de la válvula y, como ordenadas, el porcentaje de caudal máximo bajo una presión diferencial constante.

Las curvas características más significativas son: apertura rápida, lineal e isoporcentual, siendo las más empleadas estas dos últimas. Existen otras curvas características como las parabólicas y las correspondientes a las válvulas de tajadera, mariposa, Saunders y con obturador excéntrico rotativo.

Las curvas características se obtienen mecanizando el obturador para que, al variar la carrera, el orificio de paso variable existente entre el contorno del obturador y el asiento configure la característica de la válvula. En la figura 8.11 pueden verse varios tipos de obturadores cuya forma y mecanización determinan esta característica.

El obturador con *característica de apertura rápida* (figura 8.11a) tiene la forma de un disco plano, con lo que el caudal aumenta mucho al principio de la carrera llegando rápidamente al máximo. En el obturador con *característica lineal* (figuras 8.11b, 8.11f, 8.11g, 8.11i), el caudal es directamente proporcional a la carrera según la ecuación:

$$q = K \times l$$

en la que:

q = caudal a pérdida de carga constante

K = constante

l = carrera de la válvula

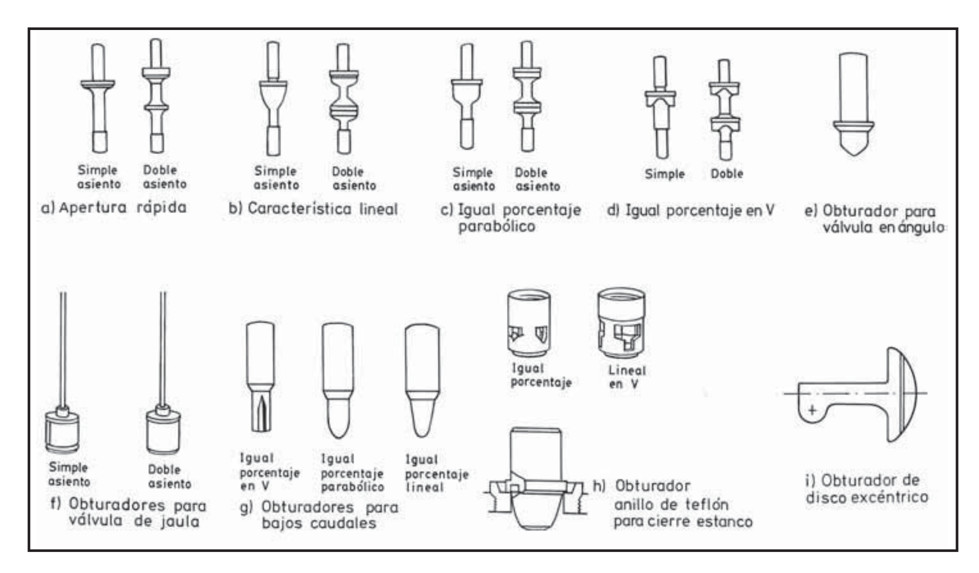


Figura 8.11 Tipos de obturadores

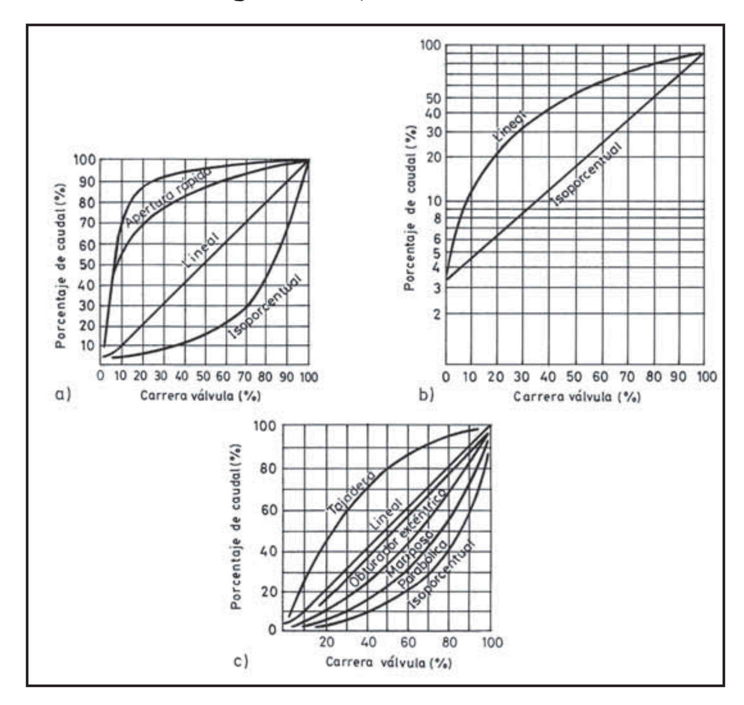


Figura 8.12 Curvas características inherentes de la válvula

Gráficamente se representa por la línea recta de la figura 8.12a. La rangeabilidad (*rangeability*) o *gama de caudales regulables*, que la válvula es capaz de regular manteniendo la curva característica inherente, es de 15 a 1 o de 30 a 1 en la válvula lineal. Si bien, teóricamente, podría ser infinita, las dificultades de fabricación la limitan a este valor.

En el obturador con característica isoporcentual (figuras 8.11b, 8.11f, 8.11g y 8.11i), cada incremento en porcentaje de carrera del obturador produce un incremento porcentual igual en el caudal. La ecuación correspondiente es:

$$\frac{\partial q}{\partial l} = a \times q$$

en la que:

q = caudal a pérdida de carga constante

l = carrera

a = constante

De aquí:

$$\frac{\partial q}{q} = a\partial l$$

E integrando:

$$\int \frac{dq}{q} = \int a \times dl$$

Luego:

$$q = b \times e^{al}$$

en la que:

a y b son constantes

e = base de los logaritmos neperianos

Si suponemos los valores siguientes:

l=0; $q = q_{mínimo} = b$

l=1; $q = q_{máximo} = q_{mínimo} \times e^{a}$

Luego:

$$q = q_{mínimo} \times \left(\frac{q_{max}}{q_{min}} \right)^{l}$$

$$\frac{q}{q_{max}} = \frac{1}{\frac{q_{max}}{q_{min}}} \times \left(\frac{q_{max}}{q_{min}} \right)^{l} = \frac{1}{R} \times R^{l}$$

que da el porcentaje de caudal en función de la rangeabilidad o *gama de caudales regulables* de la válvula. Y, si R = 50:

$$\frac{q}{q_{max}} = 0{,}02 \times 50^{l}$$

En la figura 8.12 puede verse que su representación gráfica varía si cambia el valor de R. La curva isoporcentual se caracteriza porque al principio de la carrera de la válvula, la variación de caudal es pequeña y, al final, pequeños incrementos en la carrera se traducen en grandes variaciones de caudal.

La curva *característica parabólica* corresponde a la ecuación:

$$q = K \times l^2$$

Las curvas características de las válvulas de tajadera y mariposa pueden verse en la figura 8.12c.

8.1.7.2 Características de caudal efectivas

Hay que señalar que, en la mayor parte de las válvulas que trabajan en condiciones reales, la presión diferencial cambia cuando varía la apertura de la válvula, por lo cual, la curva real que relaciona la carrera de la válvula con el caudal, se aparta de la característica de caudal inherente. Esta nueva curva recibe el nombre de *característica de caudal efectiva*.

Como la variación de presión diferencial señalada depende de las combinaciones entre la resistencia de la tubería y las características de las bombas y tanques del proceso, es evidente que una misma válvula instalada en procesos diferentes presentará, inevitablemente, curvas características efectivas distintas.

Sea, por ejemplo, un circuito típico de un proceso industrial formado por una bomba centrífuga, la válvula de control y la tubería (figura 8.13a). Es evidente que las características de impulsión de la bomba y la pérdida de carga absorbida por el sistema variarán según sea el grado de apertura de la válvula. En la figura 8.13b, puede verse que las diferencias entre la presión de impulsión de la bomba y la pérdida de carga de la tubería al variar el caudal corresponden a la pérdida de carga absorbida por la válvula y que ésta aumenta al disminuir el caudal.

Expresando la pérdida de presión de la válvula a su capacidad nominal (apertura completa), con relación a la pérdida de carga del sistema (línea + válvula) se obtiene un coeficiente r. El valor de este coeficiente dependerá del tamaño relativo de la válvula con relación al de la tubería (menor Ø de válvula = mayor valor de r) y de la resistencia de la tubería con relación al conjunto (menor resistencia = mayor r).

Para cada valor de r puede construirse una curva característica efectiva que se apartará de la curva inherente y que coincidirá con ella cuando $r = 1$, es decir, cuando la línea no absorbe presión y queda toda disponible para la válvula. Si el valor de r fuera muy pequeño, la válvula de control absorbería muy poca presión y quedaría muy distorsionada la característica inherente (figuras 8.13c y 8.13d).

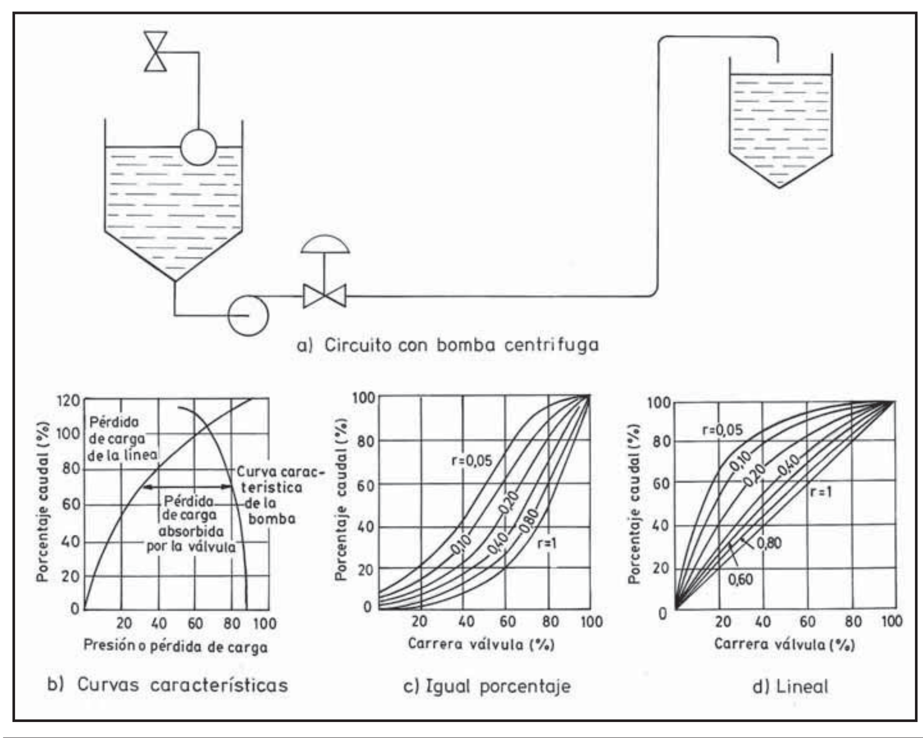
Para que la exposición sea más clara estudiemos la variación de r en un proceso más sencillo en el que la pérdida de carga total del sistema es constante (caso de un depósito que descarga a un nivel más bajo a través de una válvula de control (figura 8.13e), en lugar de depender de la característica de una bomba como en el ejemplo anterior estudiado.

De un modo general, el caudal que pasa por la válvula corresponde a la ecuación:

$$Q_v = K \times A \times \sqrt{\Delta p}$$

en la que:

Q_v = caudal a través de la válvula



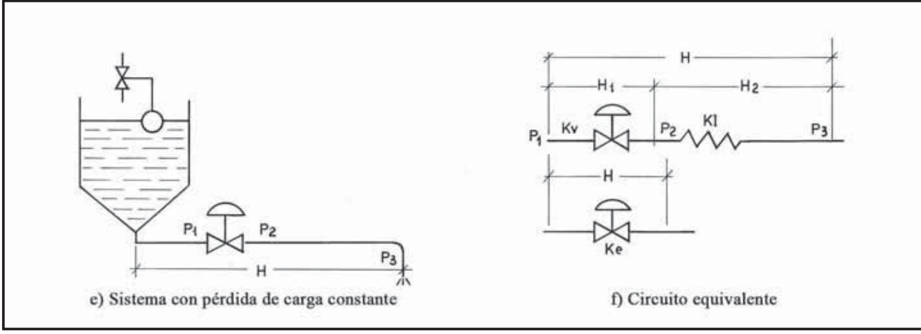


Figura 8.13 Curvas características efectivas de una válvula de control

K = constante

A = área de paso

Δp = presión diferencial a través de la válvula

Si consideramos una pérdida de carga de 1 bar y llamamos K_v al caudal que circula, tenemos:

$$K_v = K \times A$$

Luego:

$$Q_v = K_v \sqrt{\Delta p}$$

Y, por analogía, el caudal que pasa por la tubería es:

$$Q_l = K_l\sqrt{\Delta p}$$

Expresión en la que K_l es el caudal que pasa por la tubería con una pérdida de carga de 1 bar; es decir, es una constante.

Por otro lado, el coeficiente efectivo de la válvula que sustituye al conjunto anterior válvula + tubería sería K_e.

Representando con H las caídas de presión, pueden establecerse las siguientes ecuaciones:

$$Q = K_v\sqrt{H_1} = K_l\sqrt{H_2} = K_e\sqrt{H}$$

$$H = H_1 + H_2 = Q^2 \times \left(\frac{1}{K_v^2} + \frac{1}{K_l^2}\right)$$

Lluego:

$$K_e = \frac{K_v}{\sqrt{1 + \left(\frac{K_v}{K_l}\right)^2}}$$

Y, como:

$$\frac{K_v}{K_{v\,max}} = q_i$$

siendo q_i la característica de caudal inherente resulta:

$$K_e = \frac{K_{v\,max}}{\sqrt{\left(\frac{K_{v\,max}}{K_l}\right)^2 + \frac{1}{q_i^2}}}$$

Cuyo valor máximo es:

$$K_{e\,max} = \frac{K_{v\,max}}{\sqrt{\left(\frac{K_{v\,max}}{K_l}\right)^2 + 1}}$$

Luego:

$$\frac{K_e}{K_{e\,max}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{K_{v\,max}}{K_l}\right)^2 + 1}{\left(\frac{K_{v\,max}}{K_l}\right)^2 + \frac{1}{q_i^2}}}$$

Y, como:

$$r = \frac{H_1}{H} = \frac{\dfrac{Q_{max}^2}{K_{v\,max}^2}}{\dfrac{Q_{max}^2}{K_{v\,max}^2} + \dfrac{Q_{max}^2}{K_l^2}} = \frac{1}{1 + \left(\dfrac{K_{v\,max}}{K_l}\right)^2}$$

Y, sustituyendo en la ecuación anterior, se obtiene la expresión final:

$$q_e = \frac{1}{\sqrt{1 - r + \dfrac{r}{q_i^2}}}$$

que es una familia de curvas efectivas función del valor de r y de la característica inherente q_i. Si $r = 1$, la característica inherente se confunde con la efectiva.

Si la característica es lineal, $q_i = K \times l$, resulta:

$$q_e = \frac{1}{\sqrt{1 - r + \dfrac{r}{K^2 \times l^2}}}$$

Si la característica es isoporcentual con *rangeabilidad* $R = 50$, $q_i = 0{,}02 \times 50^l$, resulta:

$$q_e = \frac{1}{\sqrt{1 - r + \dfrac{r}{0{,}0004 \times 50^{2l}}}}$$

Estas dos familias de curvas están representadas en las figuras 8.13c y 8.13d, respectivamente. En la figura 8.13c puede verse que la característica isoporcentual se desplaza gradualmente hacia una curva característica lineal al ir disminuyendo r, es decir, al bajar la pérdida de carga disponible para la válvula y aumentar simultáneamente el porcentaje de pérdida de presión en la línea. Asimismo, en la figura 8.13d se aprecia que la curva característica inherente lineal se va aproximando a una curva de apertura rápida al ir disminuyendo el valor de r.

8.1.7.3 Selección de la característica de la válvula

Las *curvas efectivas* de las válvulas de control plantean un problema, el de la selección de la curva adecuada que satisfaga las características del proceso. Este punto no está suficientemente definido y es motivo de discusión constante motivada, en parte, por la falta de datos completos del proceso, de los cuales se carece a menudo: incluso a veces existe un desacuerdo aparente entre los estudios prácticos y teóricos realizados sobre la válvula.

Desde un punto de vista ideal, la característica efectiva de la válvula debe ser tal que el bucle de control tenga la misma estabilidad para todas las variaciones de carga del proceso. Un bucle de control es estable si la ganancia del bucle es menor que 1.

En el proceso (figura 8.14a), la ganancia total del bucle de control equivale al producto de las ganancias del proceso, del transmisor, del controlador y de la válvula de control.

Es decir, a:

$$G = \frac{\Delta v}{\Delta q} \times \frac{\Delta t}{\Delta v} \times \frac{\Delta s}{\Delta t} \times \frac{\Delta q}{\Delta s}$$

expresión en la que:

Δq = variación de caudal del fluido de control

Δv = incremento de la variable del proceso

Δt = incremento de la señal de salida del transmisor

Δs = incremento de la señal de salida del controlador a la válvula de control

Para facilitar el estudio dinámico, el transmisor y la válvula de control se consideran incluidos dentro del proceso, con lo cual la expresión anterior pasa a:

$$G = \frac{\Delta s}{\Delta t} \times \frac{\Delta t}{\Delta s}$$

Es evidente que la válvula de control puede modificar la ganancia del bucle. De aquí, la conveniencia de estudiar esta influencia a fin de que las variaciones que produzca, sobre la ganancia total del bucle, no den lugar a inestabilidad en el proceso para algunos puntos o en toda la carrera de la válvula.

Para simplificar el estudio consideraremos que las ganancias del transmisor y del controlador son constantes.

Señalemos que muchos procesos son lineales, es decir, sus ganancias se mantienen constantes:

$$\left(\frac{\Delta v}{\Delta q} \right) = cte$$

Así sucede en el control de nivel y de caudal con señal lineal.

En otros procesos, la ganancia deja de ser constante tal como ocurre en el control de presión, en la medida de caudal con elemento deprimógeno de diafragma y en el control de temperatura en un intercambiador.

En el *control de presión* de la figura 8.14b, la ganancia del proceso es $\Delta v / \Delta q$.

Aplicando la fórmula clásica de las válvulas de control, que más adelante se expondrá, resulta:

$$q = K_v \sqrt{\frac{v - p_0}{\rho_0}} = K_v \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_0}}$$

en la que:

q = caudal

K_v = constante

$v - p_0 = \Delta p$ = presión diferencial

ρ_0 = densidad del fluido

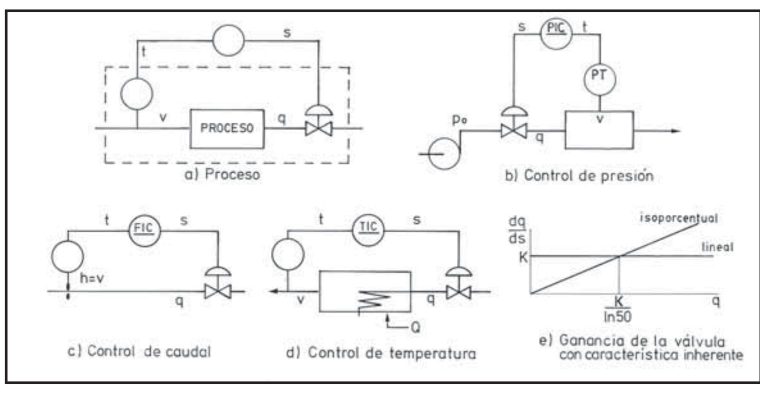
O bien:

$$\Delta p = \frac{q^2}{K_v^2} \times \rho_o$$

La variación de presión, respecto al caudal, es:

$$\frac{\Delta p}{\Delta q} = \frac{2q}{K_v^2} \times \rho_o$$

Expresión en la que puede verse que la ganancia del proceso es directamente proporcional al caudal del producto.



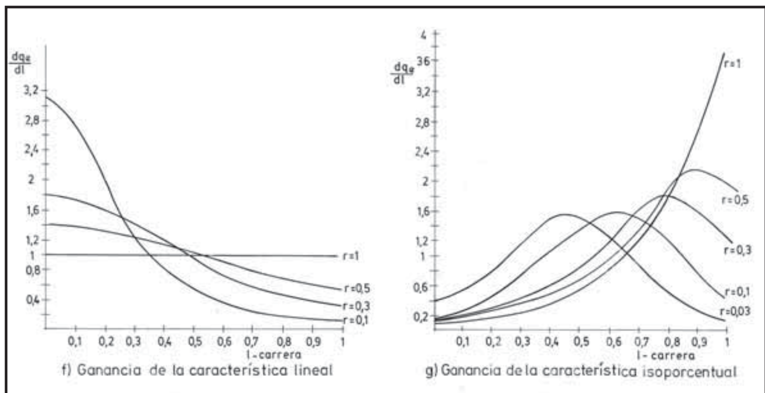


Figura 8.14 Ganancias de los elementos del bucle de control

En el *control de caudal* medido con una placa-orificio (figura 8.14c), la ganancia del proceso equivale a la relación:

$$\frac{\Delta v}{\Delta q} = \frac{\Delta h}{\Delta q} = \frac{dh}{dq} = \frac{2q}{K^2}$$

siendo q el caudal, K una constante y h la presión diferencial generada por la placa-orificio. Esta ganancia es, pues, directamente proporcional al caudal.

En los procesos de r*egulación de temperatura* en intercambiadores de calor, la ganancia es inversamente proporcional al caudal del producto. En efecto, sea por ejemplo el control de temperatura realizado mediante un fluido térmico y representado en la figura 8.14d para un producto que, para simplificar, consideramos agua.

Se verifica la ecuación:

$$Q\Delta v = q \times c \times \Delta t_f$$

en la que:

Q = caudal de agua (producto que se calienta)

v = temperatura de entrada del producto (agua)

q = caudal de fluido térmico

c = calor específico del fluido térmico

t_f = temperatura del fluido térmico de entrada

Habiendo considerado que el rendimiento de la instalación es la unidad y que la temperatura de referencia es 0 °C. Luego, derivando la expresión anterior con relación a q, resulta:

$$Q\frac{dv}{dq} = c \times \Delta t_f$$

Luego:

$$\frac{dv}{dq} = \frac{c \times \Delta t_f}{Q}$$

Es decir, la ganancia del proceso es inversamente proporcional a los cambios de carga del producto.

Hay que señalar que los casos estudiados son muy simples y además se han simplificado. Por otro lado, existen varios factores de no linealidad que alteran las características de caudal supuestas. Entre estos factores se encuentran:

- En las proximidades del cierre del obturador de la válvula, las curvas reales de caudal se apartan de las teóricas, con la excepción de las válvulas de movimiento rotativo.
- El área del diafragma del servomotor neumático y la fuerza de la presión diferencial sobre el obturador, en relación a la carrera, no son constantes, si bien el problema puede solucionarse suficientemente con los posicionadores.
- La curva característica de caudal en los líquidos es distinta en los gases y vapores.

Así pues, cuando se consideran los cambios de carga y las perturbaciones reales que pueden presentarse en el proceso, puede ocurrir muy bien que no exista ninguna válvula de control comercial que compense totalmente las variaciones de ganancia del proceso, en cuyo caso, la selección de la válvula será un compromiso entre la estabilidad del bucle y su rapidez de respuesta ante las perturbaciones.

La *ganancia de la válvula de control* viene expresada como la relación entre el incremento del caudal de salida y el incremento en la señal de entrada. Como en la práctica la variación en la señal de entrada es casi lineal con la carrera, puede admitirse que la ganancia equivale a dq_e / dl, siendo q_e el caudal efectivo de paso por la válvula y l la carrera.

Por otro lado:

$$\frac{dq_e}{dl} = \frac{dq_e}{dq_i} \times \frac{dq_i}{dl}$$

siendo q_i la característica inherente de la válvula. Como la característica efectiva es:

$$q_e = \frac{1}{\sqrt{1 - r + \frac{r}{q_i^2}}}$$

Resulta:

$$\frac{dq_e}{dq_i} = -\frac{1}{2}\left(1 - r + \frac{r}{q_i^2}\right)^{\frac{-3}{2}} \left(-\frac{r \times 2q_i}{q_i^4}\right) = \frac{r}{q_i^3} \times \frac{1}{\sqrt{\left(1 - r + \frac{r}{q_i^2}\right)^3}}$$

Y, si la válvula es *lineal* ($q_i = K \times l$), resulta:

$$\frac{dq_i}{dl} = K$$

Si la válvula es *isoporcentual* con rangeabilidad 50 ($q_i = 0{,}02 \times 50^l$), resulta:

$$\frac{dq_i}{dl} = 0{,}02 \times 50^l \times ln\,50 = q_i\, ln\,50$$

Con lo cual, la ganancia en la válvula lineal es:

$$\frac{dq_e}{dl} = \frac{r}{K^3 l^3} \times \frac{1}{\sqrt{\left(1 - r + \frac{r}{K^2 l^2}\right)^3}} \times K$$

Y, en la válvula isoporcentual, es:

$$\frac{dq_e}{dl} = \frac{r}{\left(0{,}02 \times 50^l\right)^3} \times \frac{0{,}02 \times 50^l \times ln\,50}{\sqrt{\left(1 - r + \frac{r}{\left(0{,}02 \times 50^l\right)^2}\right)^3}}$$

Que están representadas en las figuras 8.14f y 8.14g.

Como es natural, si considerásemos sólo las características inherentes, las ganancias serían:

Válvula lineal:

$$\frac{dq_i}{dl} = K$$

Válvula isoporcentual con rangeabilidad 50:

$$\frac{dq_i}{dl} = q \times ln\,50$$

Estas últimas ecuaciones nos indican que la válvula lineal tiene ganancia constante y que en la válvula isoporcentual la ganancia es directamente proporcional al caudal (figúra 8.14e). En los procesos lineales, con ganancia constante (nivel, caudal con señal lineal) interesará que la válvula se comporte también linealmente, es decir, que tenga ganancia constante a fin de no cambiar la ganancia total del bucle. La familia de curvas de la figura 8.14f nos señala las variaciones de ganancia que tienen lugar al modificarse la carrera. Comparando estas curvas con las de la figura 8.12d se aprecia que el control deja de ser apreciablemente lineal por debajo de r = 0,4, que es demasiado sensible y casi inestable en la parte inicial de la carrera y que se vuelve notablemente "perezoso" en la parte final, al necesitar una variación grande en la carrera de la válvula para aumentar apreciablemente el caudal. Así pues, en estos procesos lineales, la válvula isoporcentual es la más adecuada para r menor de 0,4, ya que su característica efectiva se aproxima a la curva característica lineal.

En el caso en que por exigencias del proceso, la pérdida de carga a través de la válvula sea elevada, del orden del 30% o más de la pérdida de carga total del sistema, es obvio que la válvula más idónea a emplear es la isoporcentual. Asimismo, aceptando que la válvula automática debe absorber una pérdida de carga determinada para realizar bien sus funciones de control, cuanto mayor sea ésta con relación a la total del sistema (r lo mayor posible) tanto más preferible será la selección de una válvula lineal.

En los procesos de caudal y de control de temperatura estudiados en que la ganancia era directamente proporcional al caudal de la válvula e inversamente proporcional al caudal del producto respectivamente, es preferible la característica isoporcentual según se desprende de las figuras 8.12c y 8.14g. En efecto, en la característica isoporcentual (%) inherente de la válvula con rangeabilidad 50, la ganancia, como relación entre el caudal y la carrera, es $dq_i / dl = q \times ln\ 50$ directamente proporcional al caudal, lo que compensa bastante las variaciones de ganancia del proceso. Al ir disminuyendo el valor de r, la válvula tiende a una característica lineal con ganancia casi constante y la compensación existirá para caudales bajos hasta la mitad de la carrera aproximadamente; esto indica que un bucle de control ajustado a valores bajos de demanda de caudal del fluido de control, es decir, con la válvula sobredimensionada se volverá "perezoso" para valores altos, ya que en esta zona la ganancia de la válvula será pequeña.

Hay que señalar que la ganancia de la válvula isoporcentual de la figura 8.14g suele presentar picos por encima del valor unidad, de tal modo que es posible que en procesos determinados se presenten inestabilidades en algunos puntos de la carrera de la válvula. Estas anomalías pueden corregirse disminuyendo la ganancia del controlador con lo que desaparecen estos puntos o zonas de inestabilidad, pero entonces el control se vuelve más perezoso en los restantes puntos de la carrera, siendo más lenta la respuesta del sistema. Este fenómeno podría subsanarse con una válvula de curva característica especial, pero ello es antieconómico y difícil de realizar porque esta curva característica debería calcularse desarrollando cálculos teóricos engorrosos que, en general, no sería factible efectuar por el desconocimiento de los datos completos del proceso.

Si en algún caso la característica de la válvula no es la adecuada para el proceso a controlar, puede acudirse a sustituir el obturador o bien a emplear un posicionador con levas adecuadas o dispositivos electrónicos que modifiquen la característica, punto éste que se estudiará más adelante.

Por otro lado, hay que hacer notar que la válvula isoporcentual tiene una rangeabilidad superior a la de la válvula lineal (50:1 la primera contra 15:1 la segunda).

Así, pues, la elección se centra fundamentalmente en la válvula lineal o en la isoporcentual. En general, podemos afirmar que la válvula más empleada es la isoporcentual, en particular cuando el comportamiento dinámico del proceso no es bien conocido o bien se sospecha que la válvula está mal calculada por no ser fiables los datos del proceso que han servido de base al cálculo, o bien existen cambios de carga importantes. En la tabla 8.13 se expone un resumen de criterios de selección de la curva característica de la válvula de control.

Selección de curvas características de la válvula de control					
Variable	**Características del proceso**	**Situación de la válvula**	**Δp en la válvula**	**Curva característica**	
Presión	Rápido		Cualquiera	Igual porcentaje (%)	
	Lento		Constante o bien Δp caudal max > 0,2 Δp caudal min	Lineal	
			Δp caudal max < 0,2 Δp caudal min	Igual porcentaje (%)	
Caudal	Señal del transmisor lineal	Serie (en la impulsión de la bomba)		Variación punto de consigna = Lineal	Variación de la carga = Igual porcentaje (%)
		Bypass (válvula instalada en un ramal a la salida de la bomba)		Variación punto de consigna = Lineal	Variación de la carga = Igual porcentaje (%)
	Señal del transmisor cuadrática	Serie (en la impulsión de la bomba)		Variación punto de consigna = Lineal	Variación de la carga = Igual porcentaje (%)
		Bypass (válvula instalada en un ramal a la salida de la bomba)		Variación punto de consigna = Igual porcentaje (%)	Variación de la carga = Igual porcentaje (%)
Nivel			Constante	Lineal	
			Δp caudal max > 0,2 Δp caudal min	Igual porcentaje (%)	
			Δp caudal max < 0,2 Δp caudal min	Apertura rápida	
Temperatura	General			Igual porcentaje (%)	

Tabla 8.13 *Selección de curvas características de las válvulas de control. Fuente: Fisher (Emerson)*

8.1.8 Servomotores

Los *servomotores* pueden ser neumáticos, eléctricos, hidráulicos, digitales y manuales, si bien se emplean generalmente los dos primeros por ser más simples, de actuación rápida y tener una gran capacidad de esfuerzo.

Puede afirmarse que el 90% de las válvulas de control utilizadas en la industria son accionadas neumáticamente.

8.1.8.1 Servomotor neumático

El *servomotor neumático* (figura 8.15a) consiste en un diafragma con resorte que trabaja (con algunas excepciones) entre 3 y 15 psi (0,2-1 bar), es decir, que las posiciones extremas de la válvula corresponden a 3 y 15 psi (0,2 y 1 bar).

Al aplicar una cierta presión sobre el diafragma, el resorte se comprime de tal modo que el mecanismo empieza a moverse y sigue moviéndose hasta que se llega a un equilibrio entre la fuerza ejercida por la presión del aire sobre el diafragma y la fuerza ejercida por el resorte.

El *servomotor* puede ser de acción directa o inversa.

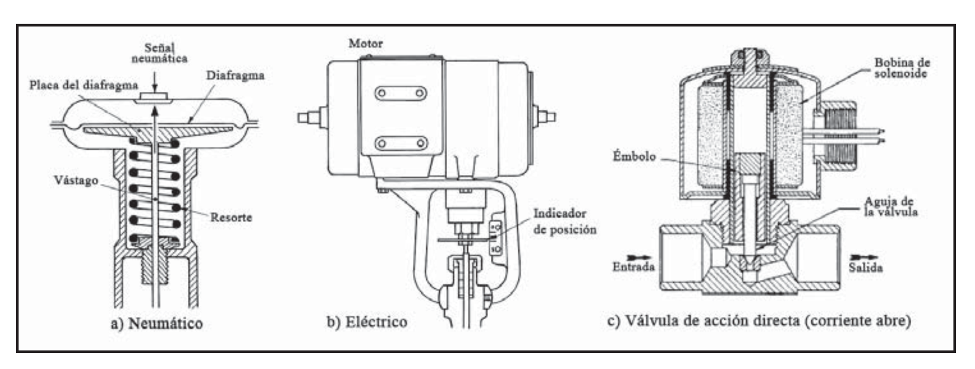


Figura 8.15 Servomotores neumático, eléctrico y válvula de solenoide

Será de *acción directa* cuando la presión de aire actúa en la cámara superior del servomotor, es decir, cuando la fuerza sobre el diafragma es ejercida hacia abajo, con lo que el vástago se extiende. Un resorte situado al otro lado del diafragma con un punto de apoyo fijo en su extremo inferior, equilibra la acción del aire.

Será de *acción inversa* cuando la presión de aire actúa en la cámara inferior del servomotor, es decir, cuando la fuerza sobre el diafragma es ejercida hacia arriba, con lo que el vástago se contrae.

Aplicado a una válvula solenoide (figura 8.15c), cuando la bobina está desexcitada la válvula está cerrada y al dar corriente el vástago es atraído por la bobina y la válvula se abre.

Estableciendo un paralelo con la válvula neumática al dar aire la válvula se abre y sin aire pasa a la posición de cierre. Se trata de una válvula de acción directa. Siguiendo estas consideraciones, al acoplar el servomotor neumático a la válvula, los términos aplicables desde el punto de vista de seguridad son:

- En fallo de aire (o sin aire) la válvula abre. Resorte abre. Aire para cerrar. Acción directa.
- En fallo de aire (o sin aire) la válvula cierra. Resorte cierra. Aire para abrir. Acción inversa.

Debe existir una proporcionalidad entre las señales intermedias y sus correspondientes posiciones. En la práctica las válvulas de control se desvían de este comportamiento debido a las causas siguientes:

1. Rozamientos en la estopada.
2. Histéresis y falta de linealidad del resorte.
3. Área efectiva del obturador que varía con la carrera del vástago de la válvula.
4. Esfuerzo en el obturador de la válvula creado por la presión diferencial del fluido.
5. Fuerza adicional del servomotor necesaria para conseguir un cierre efectivo entre el obturador y el asiento (fuerza de asentamiento).

En la válvula existe un equilibrio entre estas diversas fuerzas que viene dado por la siguiente fórmula (figura 8.16).

$$F_a \geq F_r + F_s + F_w + F_{b1} \pm F_{b2} + F_p$$

en la que:

F_a = fuerza resultante obtenida por el servomotor, en kg

F_r = fuerza de rozamiento, en kg

F_s = fuerza de asentamiento, en kg

F_w = peso del obturador, en kg

F_{b1} = fuerza elástica del fuelle de estanqueidad, en kg

F_{b2} = fuerza de desequilibrio del fuelle de estanqueidad, en kg

F_p = fuerza estática y dinámica sobre el obturador, en kg

La *fuerza resultante* F_a *obtenida por el actuador* depende de la acción de la válvula.

En una válvula de acción directa (sin aire abre - aire para cerrar), la fuerza F_a vale:

$$F_a = A_d \times P_a \times 1{,}02 - F_{sr} = A_d (P_a - F_2) \times 1{,}02$$

Con:

$$F_{sr} = A_d F_2 \times 1{,}02$$

en la que:

A_d = área efectiva del diafragma, en cm^2

P_a =presión de aire sobre el diafragma, en bar

F_{sr} = fuerza debida a la compresión final del muelle a carrera total, en kg

F_2 = compresión final del muelle a carrera total, en bar

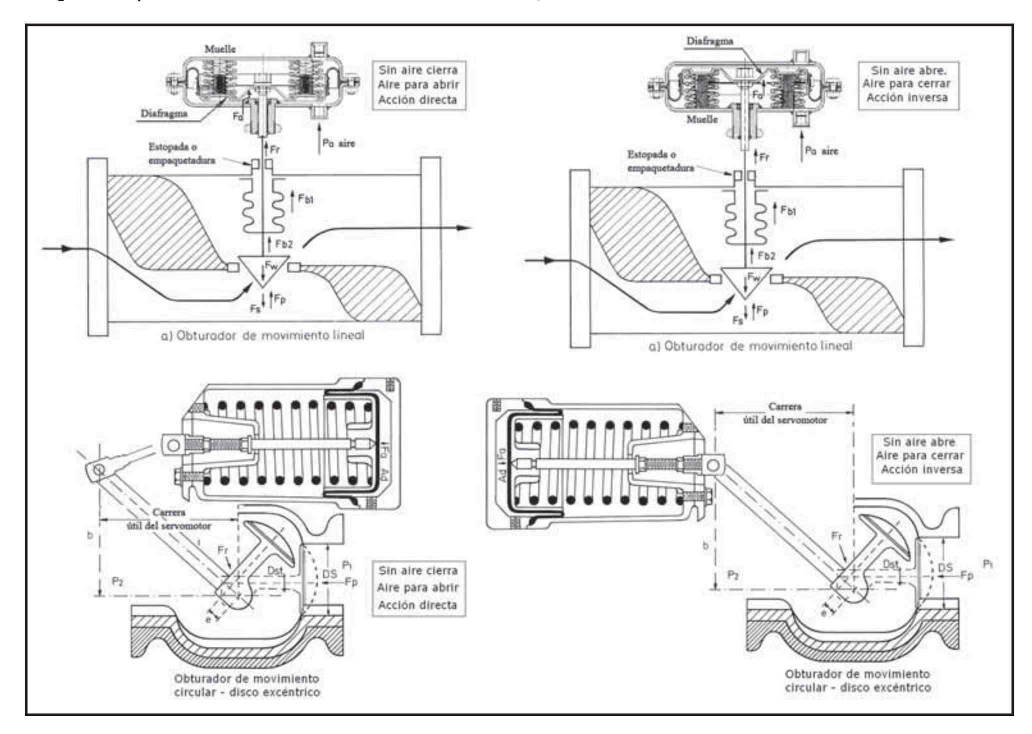


Figura 8.16 Fuerzas que actúan en una válvula de control

En una válvula de acción inversa (sin aire cierra - aire para abrir) es:

$$F_a = A_d F_1 \times 1{,}02$$

en la que:

F_1 = compresión inicial del muelle a carrera cero, en bar

Los fabricantes de válvulas normalizan los tamaños de los servomotores de acuerdo con el tamaño de los cuerpos de las válvulas donde van montados. A veces ocurre que la fuerza que proporciona un servomotor estándar no es suficiente, y es necesario utilizar un actuador sobredimensionado que para el mismo campo de compresión permita una mayor fuerza, gracias a su mayor área efectiva en el diafragma y a la mayor carrera del vástago del obturador.

Hay que señalar que los muelles que se oponen al diafragma poseen las características siguientes:

- *Margen de compresión.* Por ejemplo, 3 a 15 psi (0,2-1 bar).
- *Carrera*.
- *Gradiente*. Fuerza requerida para comprimir el muelle 1 cm.
- *Flexión total*. Centímetros de longitud con que el muelle puede comprimirse hasta que las espiras se toquen y sea imposible una compresión ulterior.

Para asegurar que las espiras del muelle no se toquen entre sí se acostumbra a utilizar, solamente, entre el 80% y 85% de la flexión total como máximo. Esto significa que restando de la carrera de la válvula, los cm de flexión total, queda como remanente la longitud de compresión inicial del muelle. Es decir, esta compresión inicial en centímetros multiplicada por el gradiente del muelle es igual a la fuerza que ejerce el resorte cuando no hay señal neumática en el servomotor.

La fuerza de rozamiento F_r en la estopada se produce entre el vástago de la válvula y la empaquetadura y depende del tipo de empaquetadura (teflón, teflón-asbestos, grafito-asbestos, etc.), de su longitud, de la compresión a que está sometida, de la temperatura, de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico, del estado de la superficie del vástago, etc. Es prácticamente imposible calcular exactamente estas influencias en una válvula de control. Una regla práctica da los valores siguientes:

Tipo de empaquetadura	Límites de presión y temperatura para un límite de 100 PPM	Servicio sin límites fijados por el medio ambiente	Rendimiento de la empaquetadura contra fugas	Índice de vida útil	Rozamiento de la estopada
PTFE anillo en V	20.7 bar / -18ºC a 93º C	-46ºC a 232 ºC	Mejor	Largo	Muy bajo
PTFE doble anillo en V	______	-46ºC a 232 ºC	Mejor	Largo	Bajo
Sello Enviro-PTFE	-46 ºC a 232 ºC	-46ºC a 232 ºC	El mejor	Muy largo	Bajo
Doble sello Enviro-PTFE	51.7 bar / -46 ºC a 232 ºC	-46ºC a 232 ºC	El mejor	Muy largo	Bajo
Kalrez con PTFE (KVSP 400)	24.1 bar / 4 ºC a 204 ºC	-40 ºC a 204 ºC	El mejor	Largo	Bajo
Kalrez con ZYMAXX (KVSP 500)	24.1 bar / 4 ºC a 260 ºC	-40 ºC a 260 ºC	El mejor	Largo	Bajo
Sello Enviro-Grafito ULF	103 bar / -7 ºC a 315 ºC	207 bar / -198 ºC a 371 ºC	El mejor	Muy largo	Medio
Sello de calidad Enviro-Grafito ULF	103 bar / -7 ºC a 315 ºC	290 bar / -198 ºC a 538 ºC	El mejor	Muy largo	Medio
Compuesto de grafito/Sello de calidad de grafito	___	290 bar / -198 ºC a 649 ºC	Mejor	Muy largo	Muy alto
Filamento grafito esparto	___	290 bar / -198 ºC a 538 ºC	Bueno	Moderado	Alto
Grafito ULF	___	290 bar / -198 ºC a 538 ºC	Mejor	Muy largo	Medio

Tabla 8.14 Fuerza de rozamiento de la estopada. Fuente: Fisher (Dresser)

La *fuerza de asentamiento* permite cerrar la válvula y conseguir que la fuga de fluido sea mínima: su valor depende del grado de mecanización del asiento y del obturador.

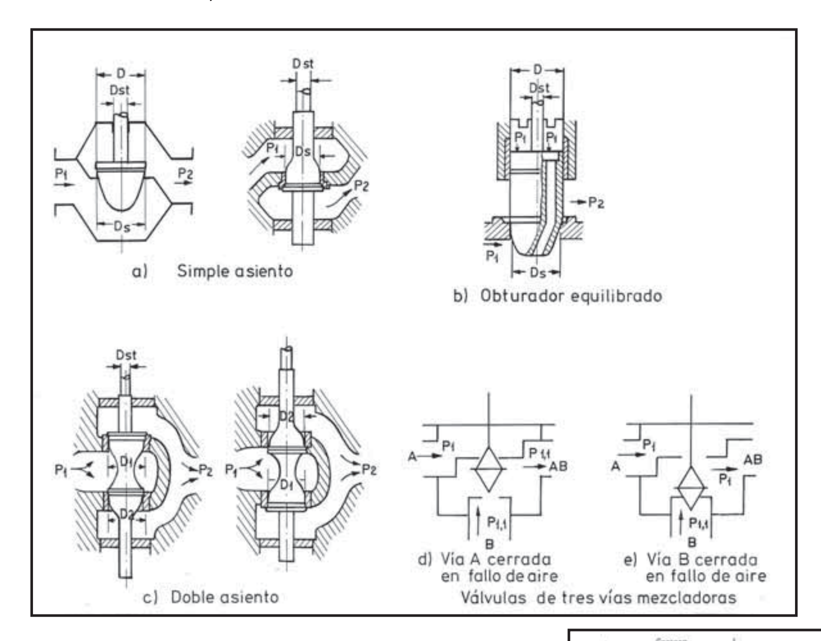
La fuerza de asentamiento en kg equivale aproximadamente a 0,25-0,75 veces la circunferencia en cm del aro del asiento. Puede aplicarse la fórmula general con un valor medio de 0,5:

$$F_s = 0{,}5 \times \pi \times D_s$$

en la que:

F_s = fuerza de asentamiento, en kg

D_s = Ø interior del asiento, en cm



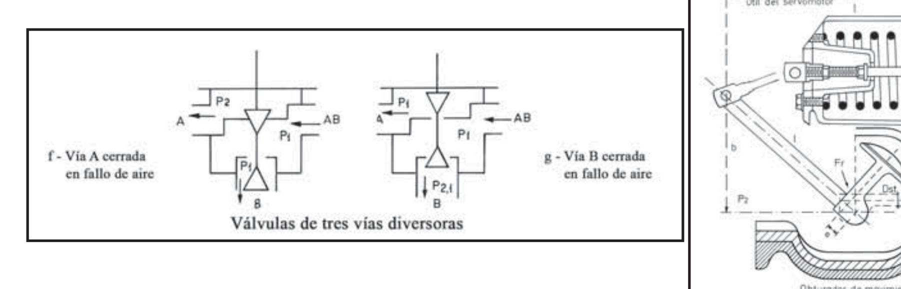


Figura 8.17 Fuerzas estáticas sobre el obturador en varios tipos de válvulas

En las válvulas con obturador de movimiento rotativo, la fuerza de asentamiento se ve facilitada por la relación de brazos de palanca del acoplamiento entre el vástago del servomotor y el árbol del obturador. Esta relación es de 3 o más, con lo cual el servomotor puede ser más pequeño que en las válvulas con obturador de movimiento lineal. Por otro lado, el rozamiento en posición de

cierre de las válvulas de obturador de disco excéntrico y de mariposa sólo se presenta para ángulos de apertura muy pequeños, mientras que, en las válvulas de globo y de bola, el elemento de cierre está en contacto con el asiento, con lo que el rozamiento es más importante.

El *peso del obturador* F_w sólo se considera cuando la válvula está en posición vertical.

La *fuerza elástica* F_{b1} del fuelle de estanqueidad obliga a una fuerza adicional en el servomotor para comprimir o tensionar los fuelles. La *fuerza de desequilibrio* F_{b2} del fuelle de estanqueidad es igual al producto del área efectiva del fuelle por la presión del fluido existente en la válvula de control.

Las *fuerzas estáticas y dinámicas* F_p en las válvulas de control son debidas, en mayor parte, a la presión del fluido sobre el obturador. En la práctica, las fuerzas dinámicas no se conocen perfectamente debido a la falta de datos de ensayo suficientes. Entre las mismas, figuran el empuje lateral del fluido y el fenómeno de succión del obturador cuando éste se aproxima al asiento debido al aumento de velocidad que se produce en el fluido. La influencia de las fuerzas dinámicas es casi despreciable frente a las demás fuerzas estáticas, en particular con el obturador en la posición de cierre. Estas fuerzas varían según el tipo de válvula:

En una válvula de simple asiento en la posición de cierre, la presión de salida P_2 es generalmente igual a cero. Examinando la figura 8.17 puede verse:

$$F_p = A_s \times P_1 \times 1{,}02 - (A_s - A_{st})\, P_2 \times 1{,}02$$

Y, si $P_2 = 0$, resulta:

$$F_p = A_s \times P_1 \times 1{,}02$$

en las que:

A_s = área del asiento en cm² = $\pi D_s^2 / 4$

A_{st} = área transversal del vástago en cm² = $\pi D_s^2 / 4$

P_1 = presión de entrada en bar

P_2 = presión de salida en bar

Y, para una válvula con el vástago en contacto con el líquido de entrada, sería:

$$F_p = (A_s - A_{st})\, P_1 \times 1{,}02 - A_s \times P_2 \times 1{,}02 = A_s\,(P_1 - P_2) \times 1{,}02 - A_{st} \times P_1 \times 1{,}02$$

Y, si $P_2 = 0$:

$$F_p = (A_s - A_{st})\, P_1 \times 1{,}02$$

En una válvula con obturador equilibrado (figura 8.17b):

$$F_p = A_s \times P_1 \times 1{,}02 - (A_p - A_{st}) \times P_1 \times 1{,}02, \text{ cuando } P_2 = 0$$

en la que:

A_p = área superior del obturador

En una *válvula de doble asiento equilibrada* (figura 8.17c) las áreas de los dos asientos son distintas para permitir que un obturador pase por el área libre del asiento del otro y así poder montar o desmontar la válvula.

Luego:

$F_p = (A_{s1} - A_{s2}) \times P_1 \times 1{,}02$, con $P_2 = 0$

en la que:

A_{s1} = área del asiento superior, en cm

A_{s2} = área del asiento inferior, en cm

En las *válvulas de tres vías mezcladoras* se presentan los siguientes casos:

a) *Servomotor de acción directa*. Vía A cerrada en fallo de aire (figura 8.17d):

$$F_p = (A_s - A_{st})\, P_1 \times 1{,}02 - A_s \times P_{11} \times 1{,}02$$

O bien:

$F_p =(A_s - A_{st})\, P_1 \times 1{,}02$, cuando $P_{11} = 0$

La fuerza sobre el diafragma F_a, que debe equilibrar la fuerza sobre el obturador, es igual a $A_d \times F$, cuando la vía B está cerrada, siendo F_1 la compresión inicial del muelle a carrera cero del obturador en bar. Luego:

$$F_p = A_s \times P_{11} \times 1{,}02 - (A_s - A_{st})\, P_1 \times 1{,}02$$

Con:

$F_p = A_s \times P_{11} \times 1{,}02$, cuando $P_1 = 0$

Y siendo:

F_{sr} = fuerza debida a la compresión final del muelle a carrera total (kg)

F_2 = compresión final del muelle a carrera total, en bar

Resulta:

$$F_a = A_d \times P_a \times 1{,}02 - F_{sr} = A_d\, (P_a - F_2) \times 1{,}02$$

b) *Servomotor de acción inversa*. Vía B cerrada en fallo de aire (figura 8.17e):

Cuando la vía B está cerrada:

$$F_a = A_d \times F_1 \times 1{,}02$$

Cuando la vía A está cerrada:

$$F_a = A_d \times P_a - F_{sr} = A_d\, (P_a - F_2) \times 1{,}02$$

En las *válvulas de tres vías diversoras* pueden presentarse los siguientes casos:

a) *Servomotor de acción inversa*. Vía A cerrada en fallo de aire (figura 8.17f):

Cuando la vía A está cerrada:

$$F_p = A_s \times P_1 \times 1{,}02 - (A_s - A_{st}) \times P_2 \times 1{,}02$$

Con:

$F_p = A_s \times P_1 \times 1{,}02$, para $P_2 = 0$

Y:

$$F_a = A_d \times F_1 \times 1{,}02$$

Cuando la vía B está cerrada:

$$F_p = (A_s - A_{st}) \times P_1 \times 1{,}02 - A_s \times P_{21} \times 1{,}02$$

con P_{21} la presión posterior en la vía B.

Con:

$$F_p = (A_s - A_{st})\ P_1 \times 1{,}02\text{, si } P_{21} = 0$$

Y:

$$F_a = A_d \times P_a \times 1{,}02 - F_{sr} = A_d\ (P_a - F_2) \times 1{,}02$$

b) *Servomotor de acción directa*. Vía B cerrada en fallo de aire (figura 8.17g):

Cuando la vía B está cerrada:

$$F_a = A_d \times F_1 \times 1{,}02$$

Cuando la vía A está cerrada:

$$F_a = A_d \times P_a \times 1{,}02 - F_{sr} = A_d\ (P_a - F_2) \times 1{,}02$$

En las válvulas de obturador de disco excéntrico rotativo (figura 8.17h) en posición de cierre, y con el fluido tendiendo a abrir, el equilibrio entre fuerzas da:

$$F_p = A_d \times P_a \times 1{,}02 - (A_s - A_{st}) \times P_2 \times 1{,}02$$

Y, si $P_2 = 0$, resulta:

$$F_p = A_d \times P_a \times 1{,}02$$

Y para una válvula con el fluido tendiendo a cerrar:

$$F_p = (A_s - A_{st}) \times P_1 \times 1{,}02 - A_s \times P_2 \times 1{,}02 = A_s \times (P_1 - P_2) \times 1{,}02 - A_{st} \times P_1 \times 1{,}02$$

Y, si $P_2 = 0$, resulta:

$$F_p = (A_s - A_{st}) \times P_1 \times 1{,}02$$

A señalar que para pasar de la fuerza F_p sobre el obturador, al par que debe ejercer el servomotor para cerrar la válvula, se tiene:

$$F_p \times l$$

Y el par que debe ejercer el servomotor para cerrar la válvula es:

$$F_p \times e$$

siendo e la distancia entre el eje del obturador y su centro de giro.

La fuerza que ejerce el servomotor es:

$$(F_p \times e)\ /\ l$$

siendo l la longitud del brazo de unión entre el vástago del servomotor y el obturador.

Varios ejemplos aclararán este estudio al lector.

EJEMPLO 1

Determinar la fuerza máxima del servomotor en una válvula de control de las siguientes características:

A_d = 940 cm

Campo de trabajo del muelle = 0,4-2 bar

Carrera del servomotor = 51 mm

Válvula de tamaño 2" (50 mm) con obturador en V

Ø interior del asiento = 5,08 cm. Área del asiento = 20,27 cm^2

Carrera del obturador = 23,8 mm. Área transversal del vástago = 0,97 cm^2

Peso del obturador = 8 kg

En fallo de aire abre. Aire para cerrar. Acción directa

Margen de trabajo del muelle para un recorrido del obturador de 23,8 mm:

$$\frac{2-0,4}{51}\times 23,8 = 0,74 \text{ bar}$$

La compresión inicial del muelle es, pues:

2 - 0,74 = 1,26 bar

Y el margen de compresión será de 1,26 - 2 bar. Luego, la fuerza del actuador con la válvula en posición de cierre es:

$$F_a = A_d \times F_1 \times 1{,}02 = 940 \times 1{,}26 \times 1{,}02 = 1208 \text{ kg}$$

La fuerza de rozamiento se considera aproximadamente de:

F_r = 10 kg (para válvulas de 1½" a 2 ½")

La fuerza de asentamiento:

$$F_s = 0{,}5 \times \pi \times 5{,}08 = 8 \text{ kg}$$

El peso del obturador F_w = 8 kg.

La fuerza estática sobre el obturador:

$$F_p = (A_s - A_{st}) \times P_1 \times 1{,}02 = (20{,}27 - 0{,}97) \times P_1 \times 1{,}02$$

Y, finalmente:

$$1208 \text{ kg} = F_a \geq 10 + 8 + 8 + (20{,}27 - 0{,}97)\, P_1 \times 1{,}02$$

Resolviendo esta ecuación, P_1 = 58,8 bar (60 kg/cm^2), es decir, la máxima presión de cierre o la presión de entrada del fluido será de 58,8 bar (60 kg/cm^2).

EJEMPLO 2

Con la misma válvula, pero de acción inversa (cierra en fallo de aire - aire para abrir) y con un campo de trabajo de 0,2 a 1 bar y una presión máxima de aire de 1,4 bar, resulta:

Margen de trabajo del muelle para un recorrido del obturador de 213,8 mm:

$$\frac{(1-0,2)\times 23,8}{51} = 0,37 \text{ bar}$$

Compresión final del muelle 0,2 + 0,37 = 0,57 bar.

Margen de compresión 0,2 - 0,57 bar.

$$F_a = A_d\,(P_a - F_2) \times 1,02 = 940 \times (1,4 - 0,57) \times 1,02 = 795,8 \text{ kg}$$

$$F_r = 10 \text{ kg}$$

$$F_s = 8 \text{ kg}$$

$$F_w = 8 \text{ kg}$$

$$F_p = A_s \times P_1 \times 1,02 = 20,27 \times P_1 \times 1,02$$

$$795,8 \text{ kg} = F_a \geq 10 + 8 + 8 + 20,27 \times P_1 \times 1,02$$

Resolviendo esta ecuación resulta:

$$P_1 = 37,2 \text{ bar} = 37,9 \text{ kg/cm}^2$$

que es la máxima presión de cierre o la presión de entrada del fluido.

EJEMPLO 3

Válvula de obturador de disco excéntrico rotativo de las siguientes características:

Campo de trabajo del muelle = 0,4 a 1 bar

Carrera del servomotor = 89 mm

Área del servomotor = 89 cm^2

Válvula de tamaño 2" (50 mm) con obturador excéntrico rotativo

Diámetro interior del asiento = 5,2 cm

Área del asiento = 21,2 cm^2

Área transversal del brazo del obturador = 1 cm^2

Giro del obturador = 60°

Longitud del brazo del obturador = 5,5 cm

Distancia entre el eje del árbol y el eje del obturador = 1,8 cm

Acción directa = En fallo de aire abre. Aire para cerrar

El movimiento lineal del vástago del servomotor equivalente al desplazamiento angular total del obturador es:

$$5,5 \times \cos 60° = 2,75 \text{ cm}$$

Margen de trabajo del muelle para un recorrido del vástago del servomotor de 89 mm:

$$\frac{1-0,4}{89} \times 27,5 = 0,18 \text{ bar}$$

La compresión inicial del muelle es:

1 - 0,18 = 0,82 bar

Y el margen de compresión será:

0,82 - 1 bar

La fuerza del actuador con la válvula en posición de cierre es:

$$F = A \times F \times 1{,}02 = 90 \times 0{,}82 \times 1{,}02 = 73{,}4 \text{ kg}$$

Y la fuerza equivalente a nivel del obturador es:

$$\frac{73{,}4 \times 5{,}5}{1{,}8} = 214 \text{ kg}$$

La fuerza estática sobre el obturador es:

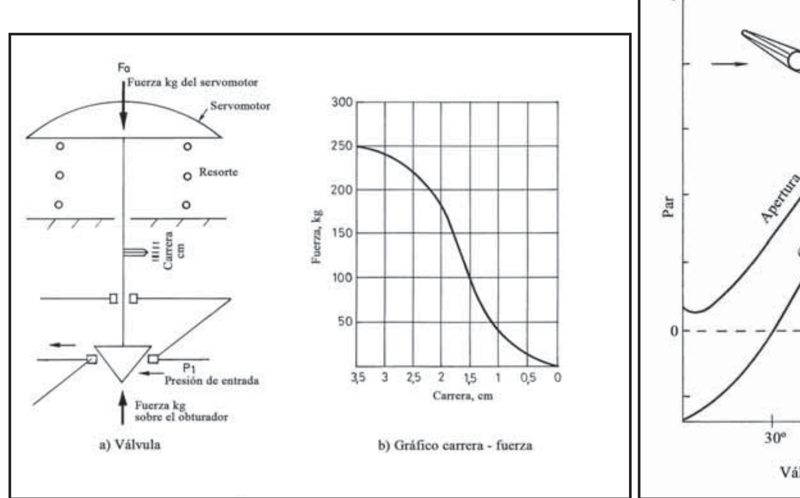
$$224 = (A_s - A_{st}) \times P_1 \times 1{,}02 = (21{,}2 - 1) - P_1 \times 1{,}02$$

Luego resulta:

$$P_1 = 10{,}8 \text{ kg/cm}^2$$

Es decir, que la máxima presión de entrada del fluido o de presión diferencial en la posición de cierre del obturador será de 10,8 kg/cm^2.

En el estudio anterior se han considerado, principalmente, las fuerzas que actúan sobre la válvula en su posición de cierre. El conocimiento de estas fuerzas es esencial para el correcto dimensionamiento de la válvula, de tal modo que los fabricantes de válvulas tienen tabulados los valores de la *presión diferencial máxima del fluido que puede admitir la válvula en posición de cierre*. Las presiones diferenciales superiores a este valor máximo impiden que la válvula cierre, lo cual puede ser inadmisible en el proceso. Por lo tanto, es necesario consultar estas tablas para una correcta selección de la válvula.



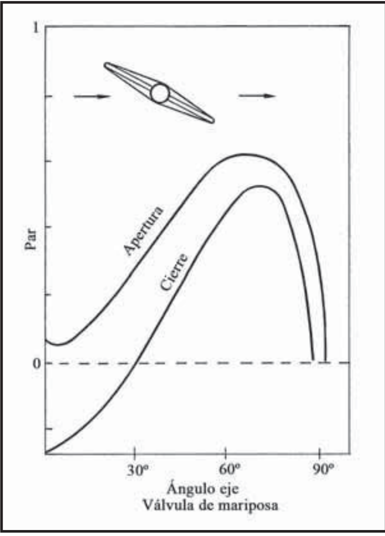


Figura 8.18 Relación carrera-fuerza en el obturador de una válvula de acción directa

Cuando la válvula no está cerrada, la presión diferencial que el fluido ejerce sobre la misma varía con el grado de abertura. Esta variación distorsiona la relación lineal teórica entre la fuerza ejercida por el servomotor y la correspondiente carrera del obturador. Sea, por ejemplo, la válvula de la figura 8.18a. En la posición de cierre, una presión diferencial de 3,3 kg (50 psi) da lugar a una fuerza dirigida hacia arriba que el fluido ejerce sobre el obturador de 250 kg (630 lbs). A medida que la válvula abre, esta fuerza se reduce ya que el obturador se aleja del área de máxima caída de presión. En la figura 8.18b puede verse un gráfico típico carrera-fuerza sobre el obturador.

El servomotor compensa esta fuerza además de vencer las restantes descritas en la ecuación de equilibrio de la válvula y, en particular, proporciona una fuerza adicional para comprimir el resorte que asienta el obturador contra el asiento cuando la válvula está cerrada con un cierre casi estanco (ver normas de caudal de fuga).

La curva de trabajo de la válvula (figura 8.19a) puede obtenerse sumando la curva carrera-fuerza sobre el obturador de la figura 8.18b, y la curva carrera presión de aire sobre el diafragma correspondiente al campo de trabajo del muelle y considerando despreciables la fuerza de rozamiento y el peso del obturador, y suponiendo la válvula sin fuelle de estanqueidad.

En el ejemplo anterior se trataba de una válvula con aire cierra (sin aire abre); en una válvula con aire abre (sin aire cierra) la compresión inicial del resorte debe ser tal que proporcione los 250 kg de fuerza requerida para cerrar la válvula y una fuerza adicional de asentamiento de 100 kg, dando lugar a un resorte de campo de 9 a 20 psi, tal como indica la figura 8.19b.

En las curvas resultantes de las figuras 8.19a y 8.19b se observa que las variaciones de presión, en el servomotor neumático, no se corresponden linealmente con la carrera. Sin embargo, podremos considerar con una cierta aproximación que la relación presión en membrana/carrera es casi lineal.

En el caso de una válvula con obturador de movimiento rotativo, el servomotor actúa con un par motor sobre el eje del obturador a través de un brazo de enlace. La correspondiente representación del campo de trabajo de la válvula puede verse en la figura 8.19c, que indica la relación entre el par motor y el desplazamiento angular del eje del motor. Se observa que siendo la conexión directa entre el vástago del servomotor y el brazo del obturador, el par varía, siendo el máximo cuando el giro del obturador es de 45°.

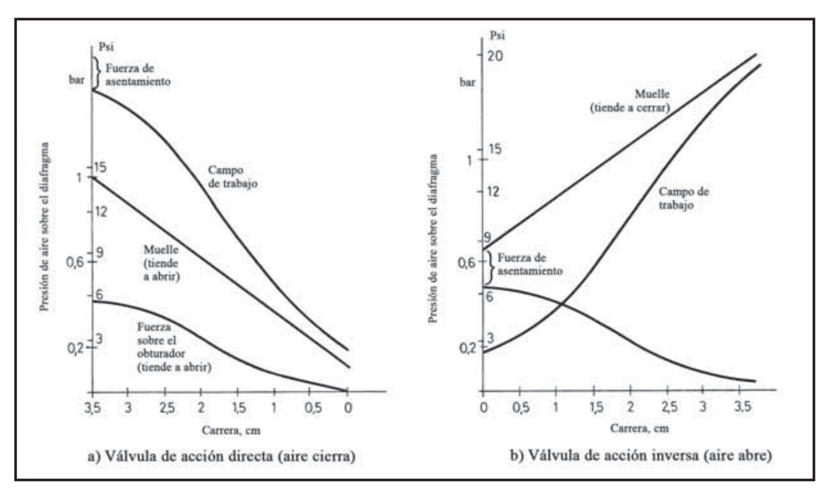


Figura 8.19 Campo de trabajo de una válvula

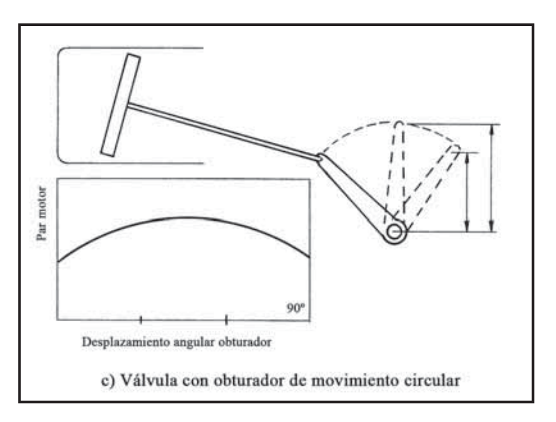


Figura 8.19 continuación Campo de trabajo de una válvula

8.1.8.2 Servomotor eléctrico

Existen dos tipos diferentes de servomotores eléctricos, los dedicados al control de clima (calefacción, ventilación y aire acondicionado) (HVAC = *Heating, Ventilating, Air Conditioning*) y los proyectados para el control industrial. Los primeros se caracterizan por su poco par y por el tiempo largo de accionamiento (1 minuto), mientras que los segundos disponen de un par elevado y un tiempo de accionamiento rápido (de 10 a 60 segundos).

La *válvula motorizada eléctrica* no necesita aire para su accionamiento. Ante las presiones diferenciales elevadas del fluido y la velocidad de actuación que se exige en la industria, el servomotor eléctrico debe disponer de un par elevado y, por lo tanto, tiene un tamaño considerable. De aquí, que las válvulas motorizadas para aire acondicionado donde no se precisa de un actuación rápida, sólo se empleen en equipos autónomos que carezcan de compresor de aire, o en instalaciones que dispongan de poco par. Normalmente no se utilizan en procesos industriales, donde la rapidez y exactitud de actuación es importante.

8.1.8.2.1 Servomotores para control de clima (HVAC - aire acondicionado)

Existen básicamente tres tipos de circuitos eléctricos de control capaces de actuar sobre el motor: todo-nada, flotante y proporcional con elementos mecánicos de actuación (finales de carrera o reóstatos).

El *circuito todo-nada* representado en la figura 8.20 consiste en un motor eléctrico unidireccional acoplado al vástago de la válvula con una leva que fija el principio y el final de la rotación del motor gracias a dos interruptores de final de carrera S1 y S2.

Según la posición del elemento de control (cierre entre los contactos 1-2 o entre 1-3) se excita el devanado de la derecha o el de la izquierda de la figura y el motor gira, en uno u otro sentido, hasta el final de su carrera.

El *circuito flotante* de la figura 8.21 consiste en un motor eléctrico bidireccional con interruptores de fin de carrera, acoplado al vástago de la válvula. El interruptor del controlador "flota" entre los dos contactos de accionamiento y acciona el motor a derechas o a izquierdas según que el controlador cierre el contacto correspondiente, parándose en caso contrario.

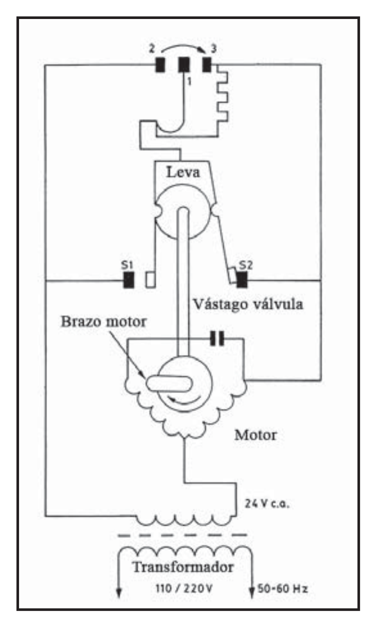


Figura 8.20 Servomotor eléctrico para circuito todo-nada

El *circuito proporcional* de la figura 8.22 está formado por un motor bidireccional, un relé de equilibrio y un potenciómetro de equilibrio. El controlador es un potenciómetro cuyo brazo móvil se mueve de acuerdo con el valor de la variable del proceso.

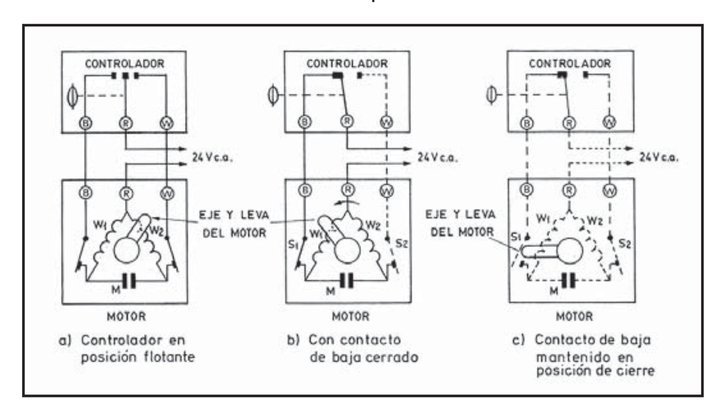


Figura 8.21 Servomotor eléctrico flotante

El relé de equilibrio es una armadura ligera en forma de U que pivota en su centro entre dos bobinados de control; posee una lámina con un contacto móvil que flota entre dos contactos fijos conectados a las bobinas del motor a través de dos interruptores de final de carrera.

Si las posiciones de los brazos móviles en los dos potenciómetros, el del controlador y el del motor se corresponden, la corriente que fluye en los dos bobinados de control es la misma y la armadura del relé de equilibrio permanece neutra. Por el contrario, si varía la señal de salida del controlador, el brazo móvil de su potenciómetro cambia de posición, variando la corriente de paso entre los dos

bobinados de control. La armadura bascula y el contacto móvil cierra el circuito de excitación de uno de los dos bobinados del motor, con lo cual éste gira en el sentido correspondiente hasta que la posición del brazo móvil de su potenciómetro se corresponde con la del controlador; en este instante la armadura queda equilibrada y el motor se para.

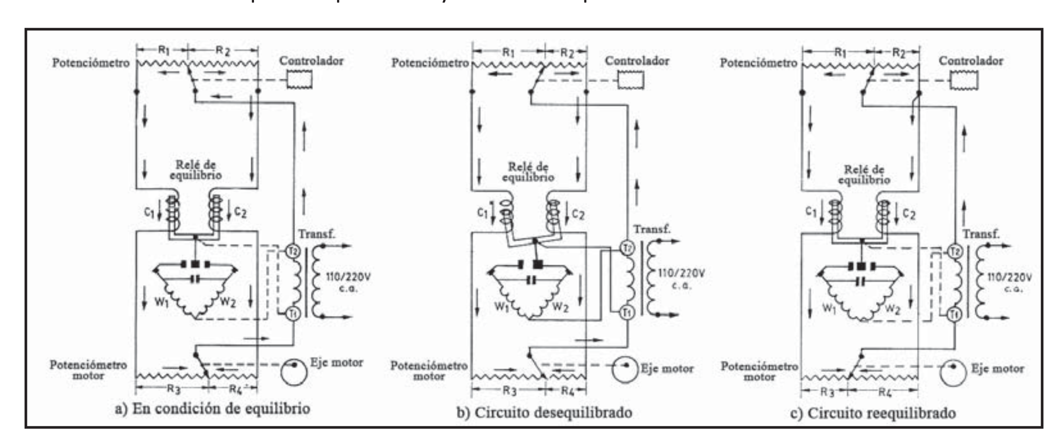


Figura 8.22 Servomotor proporcional

8.1.8.2.2 Servomotores para control industrial

Tradicionalmente, las industrias han utilizado exclusivamente servomotores neumáticos para las válvulas de control. Los actuadores eléctricos han avanzado en tecnología en cuanto a velocidad, par disponible, conexiones aptas para la señal de 4-20 mA c.c., las comunicaciones HART, Foundation Fieldbus y otros. Además, el motor eléctrico, una vez calibrado, puede funcionar sin problemas durante meses o años. El registro del número de carreras y del camino recorrido por el vástago, han facilitado el trabajo de mantenimiento, y personal con poca experiencia puede predecir, por ejemplo, cuando habrá que cambiar la estopada de la válvula.

Se sabe que el coste de la producción de aire comprimido para la alimentación de las válvulas neumáticas, es importante y se estima en un 40%-50% la pérdida de energía en la conversión electricidad (o vapor) a aire comprimido. De aquí que, presumiblemente, es más económico ahorrarse el coste y mantenimiento de un compresor para aire de instrumentos y utilizar directamente la energía eléctrica para mover el servomotor eléctrico de la válvula de control. Es, pues, de interés realizar una comparación entre dos válvulas similares, una con servomotor neumático y otra con motor eléctrico.

Coste anual del accionamiento de una válvula neumática mediante un compresor de aire considerando que, cuando está en marcha a plena carga (15% del tiempo), su rendimiento es del 94,5% y que, cuando funciona al 25% de la carga total (85% del tiempo), su rendimiento es del 90%.

$$Compresor\ en\ marcha\ (15\%\ del\ tiempo) = \frac{2\ CV \times 0,746\ kW\ /\ CV \times 8760\ horas\ /\ año \times 0,09\ €\ /\ kWh \times 0,15 \times 1}{0,945} = 186,7\ €$$

$$Compresor\ parado\ (85\%\ del\ tiempo) = \frac{2\ CV \times 0,746\ kW\ /\ CV \times 8760\ horas\ /\ año \times 0,09\ €\ /\ kWh \times 0,85 \times 0,25}{0,9} = 277,7\ €$$

Coste/año de funcionamiento del compresor sin incluir costes de reparación:

186,7 + 277,7 = 464,4 €

Estimado con costes de reparación:

1,2 × 464,4 = 557 €

El coste anual de operación de una válvula con motor eléctrico de 30 W, trabajando en el proceso el 15% del tiempo y estando parada el 85% del tiempo, es de:

$$Coste\ total = 0,09\ € / 1.000\ Wh \times 0,15 \times 30\ W \times 8760\ horas / año = 3,54\ €$$

Luego, el coste de operar una válvula neumática es 157 veces mayor que el de una válvula con motor eléctrico, con lo cual, aunque el coste inicial de la válvula con motor eléctrico es más elevado, es factible su rentabilidad. Además, las válvulas de control eléctricas pueden sustituir, rápida y fácilmente, las neumáticas y tienen la ventaja adicional de que, al prescindir del compresor, están libres de la emisión de CO_2 y de polución sonora.

Sin embargo, el servomotor neumático continúa empleándose en la industria porque se comporta como un filtro ante las oscilaciones de la señal de control que se producen cuando la variable, en especial la presión y el caudal, varían rápidamente. Oscilaciones del tipo de 0,0007 bar (0,01 psi) a la frecuencia de 2 Hz son absorbidas perfectamente por la capacidad en volumen de aire del servomotor neumático, sin causar ningún movimiento del vástago de la válvula. Estas oscilaciones pueden causar el desgaste prematuro de los engranajes de un motor eléctrico, al responder éste instantáneamente. Otros motivos de la utilización del servomotor neumático son su bajo coste de compra, su mayor fiabilidad, una alta respuesta frecuencial y la posición de seguridad (sin aire abre o sin aire cierra) ante un fallo en la presión del aire de alimentación.

En el servomotor eléctrico, la forma normal de conseguir la seguridad es utilizar un resorte que fuerce a la válvula a situarse en la posición deseada (abierta o cerrada) ante un fallo en la alimentación eléctrica, lo que obliga a una mayor potencia y a un mayor tamaño del motor.

Otra forma es utilizar una batería de reserva para excitar el motor y continuar controlando el proceso, con la salvedad de que repetidos fallos de energía eléctrica de la planta pueden agotar la batería.

El tercer método es almacenar la energía en un banco de súper-condensadores de alta densidad de carga y utilizar la energía almacenada para situar la válvula en la posición de fallo de energía. El tiempo de carga de los condensadores es de menos de 1 minuto y puede cargarse y descargarse un número ilimitado de veces.

El circuito electrónico del servomotor compara la tensión del potenciómetro de realimentación con la tensión de la señal de control. Si son diferentes, la señal de error cierra el triac correspondiente del circuito y excita el motor en la dirección correspondiente para anular la señal de error, con lo que el circuito estará de nuevo equilibrado.

En la figura 8.23 puede verse uno de los circuitos dotado de control del ángulo de conducción. El tiristor adecuado dispara cuando existe una señal de error entre la tensión de realimentación generada por el potenciómetro de posicionamiento de la válvula y la tensión derivada de la señal de control de entrada. Por lo tanto, el motor se moverá en el sentido adecuado para reducir y eliminar el error. Si la señal de error es pequeña, un circuito repetidor enciende el disparador adecuado para excitarle más rápidamente durante un instante y ayudar así a vencer el rozamiento inicial que presenta la válvula en estado de reposo. Por otro lado, el grado de encendido es proporcional al error, por lo cual el motor decelera automáticamente cuando llega a la posición correcta y, de este modo, disminuye el rebasamiento que de otro modo se produciría al tender el sistema a buscar la posición de equilibrio.

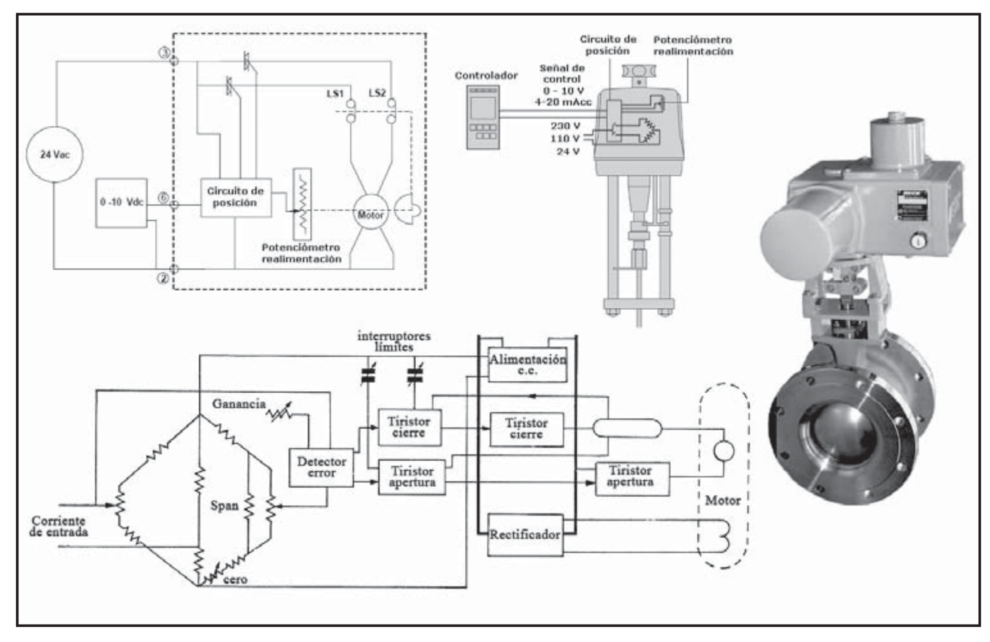


Figura 8.23 Servomotor industrial de estado sólido. Fuente: Honeywell y Beck

Estos sistemas pueden alcanzar una precisión en el posicionamiento del motor de 0,5% de la carrera, con velocidades del vástago de hasta 10 mm/segundo, si bien, los motores estándar emplean de 30 a 60 segundos para efectuar toda la carrera. Algunos motores permiten el ajuste del par (30% al 100% del máximo), el ajuste de la velocidad (25% al 100% de la máxima) y el ajuste de la carrera, mediante un módulo electrónico de control CMOS. En este caso, este módulo se encarga también del giro del motor en la dirección correcta, y de la protección frente a objetos que puedan introducirse dentro de las partes internas de la válvula y que impidan el cierre, es decir, el asentamiento del obturador contra el asiento.

Los pares de potencia disponibles suelen ser de 45 N × m, 400 N × m y 7.500 N × m. Disponen de comunicaciones RS485/Modbus RTU y de un software para programarlos de acuerdo con el tipo de control. El software facilita el mantenimiento, ya que permite registrar las temperaturas mínima y máxima, el recorrido total, el número de arranques, etc. El tiempo empleado en la carrera para un ángulo de 90° varía de 10 a 60 segundos. La repetibilidad es del ± 0,2%.

8.1.8.3 Válvula de solenoide

La *válvula de solenoide o electroválvula* es un dispositivo para controlar el flujo de un fluido a su paso por una tubería. Consiste en dos partes básicas, el solenoide y la válvula. El solenoide es una bobina que convierte la energía eléctrica en energía mecánica para accionar, normalmente, la válvula desde la posición cerrada a la abierta, es decir, en ausencia de alimentación eléctrica la válvula está cerrada mediante un muelle y, al excitar el solenoide, se abre (acción directa) por atracción del émbolo unido al obturador. La válvula también puede ser normalmente abierta (acción inversa), es decir que pasa a la posición de abierta, mediante un muelle, ante el fallo de la alimentación eléctrica. Para una máxima seguridad, la válvula de solenoide está continuamente excitada; de este modo, si falla la corriente, la válvula de control pasa a la posición de seguridad.

La bobina puede accionar directamente la válvula o bien puede hacerlo a través de una válvula piloto secundaria, en cuyo caso, la energía necesaria la suministra la presión del propio fluido.

En instalaciones donde la seguridad es primordial, por ejemplo, en calderas de vapor, la válvula es de reajuste manual, lo que significa que una vez ha disparado por fallo en cualquiera de las variables de seguridad (presión del gas, fallo de llama, nivel bajo, etc.) queda enclavada en la posición de seguridad, y el operario debe ir personalmente a la válvula de solenoide y accionar una palanca para abrirla (o cerrarla). De este modo, se previene el arranque inadvertido del proceso. La norma DIN-ISO 1219 indica la simbología de las válvulas distribuidoras.

La válvula puede ser de dos o tres vías. Una aplicación típica de la válvula de solenoide de tres vías es el enclavamiento de la válvula de control en una posición que suele ser la correspondiente a fallo de aire. En esta maniobra, la excitación de la bobina de válvula de solenoide comunica la vía de la cámara del servomotor con la vía conectada a la atmósfera (vía C con la vía E), con lo que la válvula de control pierde aire y pasa a la posición de sin aire abre o sin aire cierra (según su acción); la cámara puede también comunicarse con aire a presión (vía E a la vía C), pasando así la válvula a la posición inversa de con aire abre o con aire cierra.

Asimismo, la válvula de solenoide puede estar conectada a un manorreductor y, de este modo, la válvula de control puede accionarse manualmente independientemente del controlador.

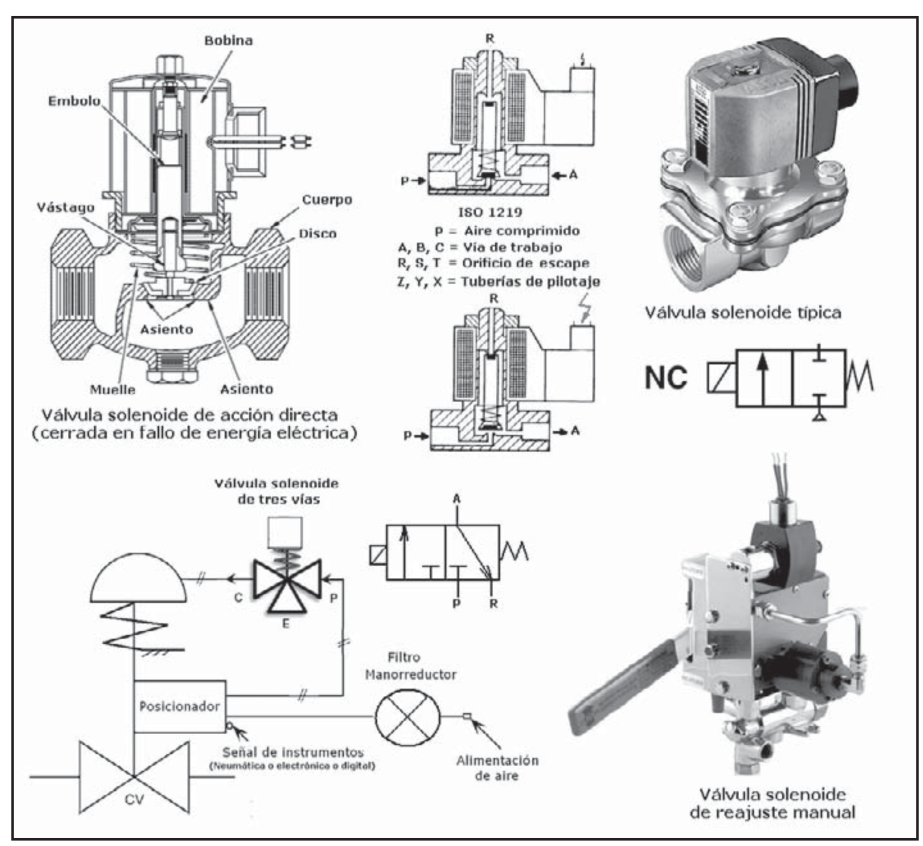


Figura 8.24 Tipos de válvulas de solenoide. Fuente: ASCO

La válvula de solenoide puede realizar un control proporcional de tiempo variable mediante una unidad de control electrónico que envía a la bobina impulsos de anchura modulada. La conexión/desconexión (*on-off*) rápida de la tensión de alimentación a la bobina forma una onda cuadrada y se varían los tiempos de conexión para compensar las variaciones de temperatura.

Los materiales elastómeros normalmente utilizados en las válvulas de solenoide son: NBR (Buna 'N', Nitrile), CR (Neoprene), EPDM (Ethylene Propylene), FKM (Viton®/Fluorel®) y PTFE (Teflon®, Rulon).

En la figura 8.24 pueden verse varios tipos de válvulas de solenoide.

El tamaño de las válvulas de solenoide queda definido por el coeficiente de caudal C_v *que es el caudal de agua en galones USA por minuto a la temperatura de 60 °F (15,5 °C) que pasa a través de la válvula en posición completamente abierta y con una pérdida de carga de una libra por pulgada cuadrada (psi);* y en unidades métricas *es el Caudal de agua a 20 °C en m³/h que pasa a través de la válvula a una apertura dada y con una pérdida de carga de 1 bar (10⁵ Pa) (1,02 Kg/cm²)*. La equivalencia entre las dos es:

$$K_v = 0{,}853 \times C_v \text{ (m}^3\text{/h)}$$

$$C_v = 1{,}16 \times K_v \text{ (galones por minuto)}$$

En la tabla 8.15 encontramos algunos coeficientes de la válvula de selenoide. Más adelante se amplía la información sobre el cálculo del tamaño de la válvula de control, donde se exponen los métodos para determinar el C_v o K_v en base a las condiciones del proceso (presión, caudal, temperatura, etc.).

8.1.8.4 Servomotor hidráulico

Los *servomotores hidráulicos* (figura 8.25) consisten en una bomba de accionamiento eléctrico que suministra fluido hidráulico a una servoválvula. La señal del instrumento de control actúa sobre la servoválvula que dirige el fluido hidráulico a los dos lados de un pistón actuador hasta conseguir, mediante una retroalimentación, la posición exacta de la válvula.

Coeficiente C_v y K_v de la válvula de solenoide							
Orificio aproximado		C_v aproximado	K_v aproximado	Orificio aproximado		C_v aproximado	K_v aproximado
pulgadas	mm			pulgadas	mm		
1/32	0,79	0,02	0,02	1/2	12,70	3,5	2,99
3/64	1,19	0,06	0,05	5/8	15,88	4,5	3,84
1/16	1,59	0,09	0,08	11/16	17,46	5	4,27
3/32	2,38	0,20	0,19	3/4	19,05	7,5	6,40
1/8	3,18	0,30	0,26	1	25,40	13	11,09
9/64	3,57	0,36	0,31	1 1/4	31,75	17	14,50
3/16	4,76	0,53	0,45	1 1/2	38,10	25	21,33
1/4	6,35	0,70	0,60	2	50,80	48	40,94
5/16	7,94	1,7	1,45	2 1/2	63,50	60	51,18
3/8	9,53	2	1,71	3	76,20	100	85,30

Tabla 8.15 Coeficiente C_v y K_v de la válvula de solenoide. Fuente: ASCO

Otro modelo de pistón es parecido al servomotor de diafragma, por un lado es alimentado por el fluido hidráulico y por el otro tiene un resorte. Los servomotores hidráulicos se caracterizan por ser extremadamente rápidos, potentes y suaves, si bien su coste es elevado, por lo que sólo se emplean cuando los servomotores neumáticos no pueden cumplir con las especificaciones de servicio.

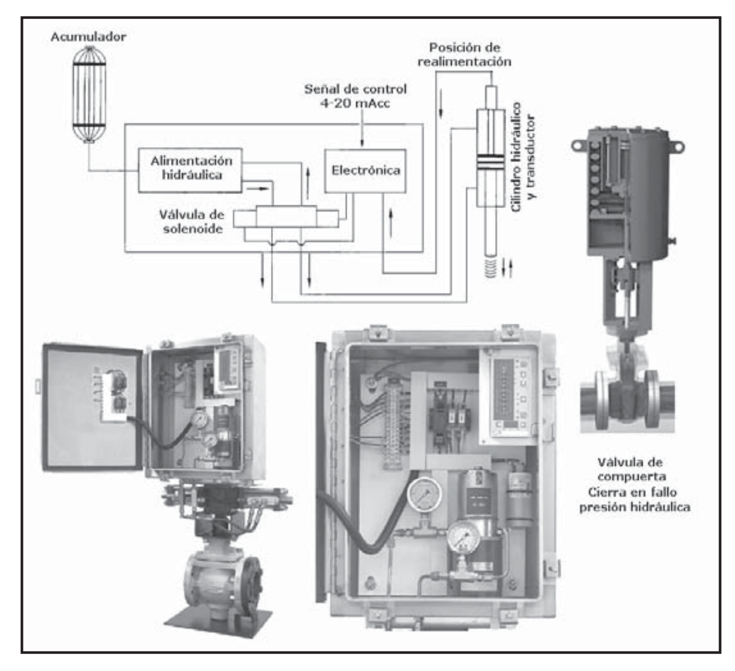


Figura 8.25 *Servomotor hidráulico. Fuente: ATI*

8.1.8.5 Servomotor digital

Las *servomotores de válvulas digitales* (figura 8.26) son controladores digitales que disponen de compuertas neumáticas accionadas por electroválvulas que, a su vez, son excitadas por la señal de salida binaria de un microprocesador. Su respuesta es muy rápida (una compuerta 500 ms) y el grado de abertura depende de la combinación de las compuertas (8 compuertas darán 1, 2, 4, ..., 128 relaciones de capacidad). En la figura puede verse su respuesta dinámica carrera-tiempo ante 4 señales en escalón del 10% en subida y en bajada.

Los servomotores de válvulas digitales presentan varios aspectos de interés:

- Configuración y calibración automática que ahorra mucho tiempo frente a la calibración clásica de cero y multiplicación (*span*).
- Diagnóstico de la válvula mientras está en funcionamiento en el proceso.
- Señal de salida 4-20 mA c.c. sobre dos hilos combinada con el protocolo digital HART.
- Comunicaciones Fieldbus.

Estas válvulas tienen una constante de tiempo de unos 0,3 segundos, si bien su velocidad de apertura tan rápida no representa una ventaja esencial frente a las válvulas neumáticas industriales (5 a 20 segundos según el tamaño), y su coste es elevado.

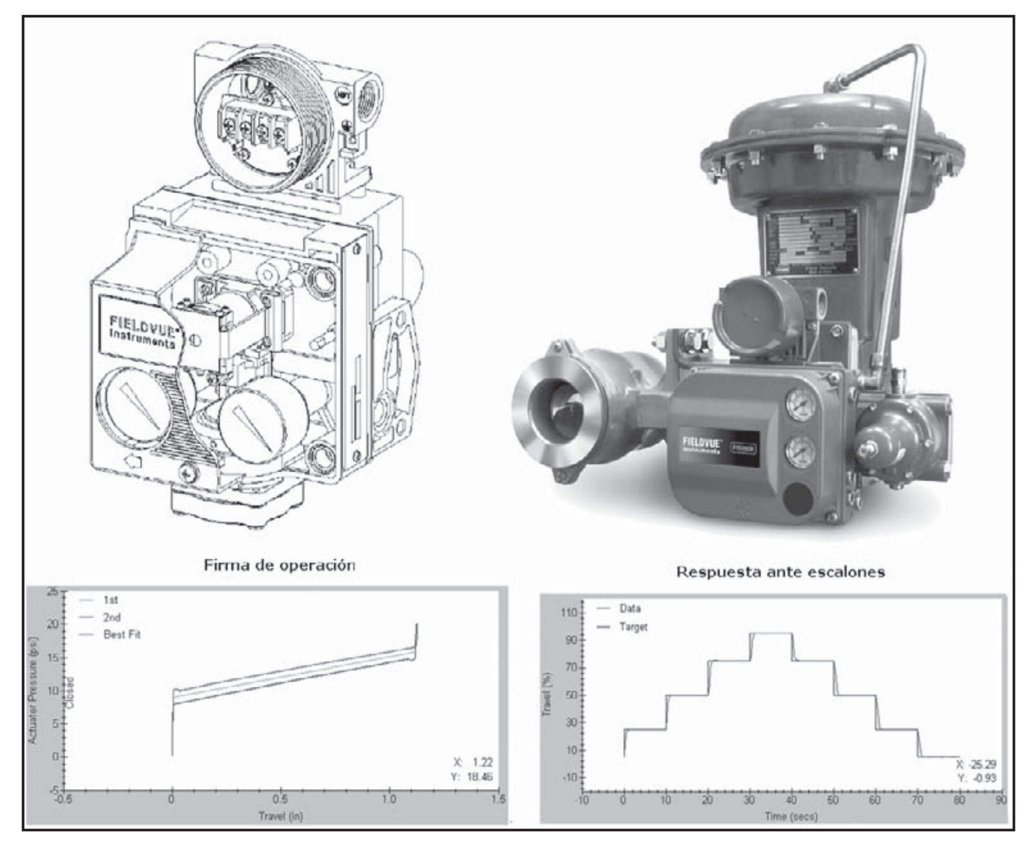


Figura 8.26 *Servomotor digital. Fuente Fisher FieldVue*

8.1.8.6 Tipos de acciones en las válvulas de control

Los cuerpos de las *válvulas de control* pueden tener dos tipos de acciones. Se dividen en válvulas de *acción directa*, cuando tienen que bajar para cerrar, e, inversa, cuando tienen que bajar para abrir (derivado de los grifos domésticos donde al girar el volante a derechas, el vástago baja y la válvula cierra) (figura 8.27).

Esta misma división se aplica a los servomotores, que son de *acción directa* cuando aplicando aire, el vástago se mueve hacia abajo, e *inversa* cuando al aplicar aire el vástago se mueve hacia arriba.

Al combinar estas acciones se considera siempre la posición de la válvula sin aire sobre su diafragma, con el resorte manteniendo el diafragma y, por tanto, la válvula en una de sus posiciones extremas. Cuando la válvula se cierra al aplicar aire sobre el diafragma o se abre cuando se quita el aire debido a la acción del resorte, se dice que la válvula sin aire abre o aire para cerrar (*acción directa*).

Al abrir la válvula cuando se aplica aire sobre el diafragma y se cierra por la acción del resorte cuando se quita el aire, se dice que la válvula sin aire cierra o aire para abrir (*acción inversa*). Consideraciones análogas se aplican a las válvulas con servomotor eléctrico:

- *Acción directa*: con el servomotor desexcitado la válvula está abierta.
- *Acción inversa*: con el servomotor desexcitado la válvula está cerrada.

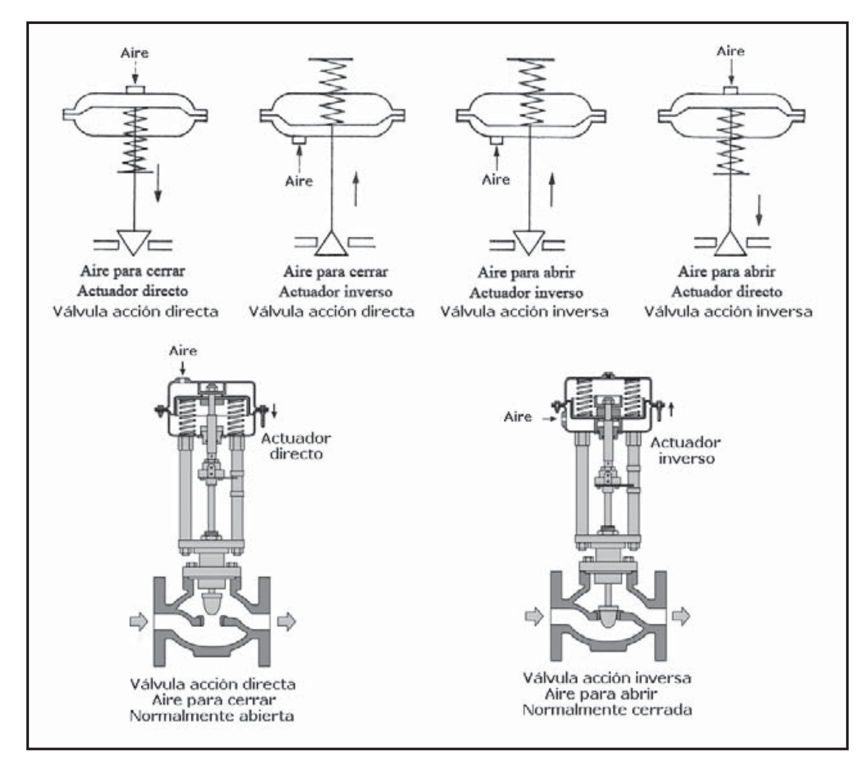


Figura 8.27 *Tipos de acciones en las válvulas de control*

Al seleccionar la válvula es importante considerar estos factores desde el punto de vista de seguridad. Ninguna instalación está exenta de averías y una de ellas puede ser un fallo de aire o de corriente de alimentación, con lo cual la válvula pasa, naturalmente, a una de sus posiciones extremas y ésta debe ser la más segura para el proceso. En las válvulas de acción inversa, en las que el resorte del servomotor neumático o eléctrico asienta el obturador en el asiento, cerrando así la válvula, es importante consultar las tablas del fabricante para comprobar la presión diferencial máxima con que la válvula podrá cerrar. Por ejemplo, en el caso de un intercambiador de calor en el que una alta temperatura sea perjudicial para el producto, interesará que la válvula de control cierre sin aire (válvula neumática) o bien cierre con el servomotor desexcitado (válvula eléctrica).

Las válvulas de control pueden presentar *fugas en la posición de cierre*. La fuga de fluido, que se produce a través del conjunto asiento-obturador, está normalizada en la norma ANSI/FCI 70-2-2006 (sustituye a ANSI FCI/70-2 1976) y su equivalente es la IEC 60534, parte 4, 3ª edición de Junio de 2006. Las fugas admisibles son del 0,01% del caudal máximo en la válvula de simple asiento (Clase IV metal a metal) y de 0,1% en la válvula de doble asiento (Clase III). Asimismo, las válvulas con asiento dotado de anillo de teflón para cierre estanco (Clase VI) admiten un caudal de fuga, de 0,00001% o 0,15 a 6,75 ml/minuto según el tamaño, de aire o nitrógeno.

8.1.9 Accesorios

La válvula de control puede tener acoplados diversos tipos de accesorios para realizar funciones adicionales de control. Entre los mismos se encuentran los que siguen.

Fugas de fluido según la norma ANSI/FCI 70-2-2006					
Clase de fuga	Fuga máxima del asiento	Fluido de prueba	Presión de prueba	Cierre relativo del asiento respecto a la Clase II	Tipo de asiento
Clase I	–	–	Fuga sin especificar (no es necesario realizar ningún ensayo)	A prueba de polvo	–
Clase II	0,5% del C_v nominal	Agua	45 a 60 psi (3,1 bar a 4,1 bar)	1	Metálico
Clase III	0,1% del C_v nominal	Agua	45 a 60 psi (3,1 bar a 4,1 bar)	0	Metálico
Clase IV	0,01% del C_v nominal	Agua	45 a 60 psi (3,1 bar a 4,1 bar)	0	Metálico
Clase V	0,0005 del C_v nominal	Agua	Máxima pérdida de carga en operación	1/300.000	Metálico
Clase VI	unos 0,9 ml/min	Aire	50 PSI (3,4 bar)	1/600.000	Resiliente

Tabla 8.16 Fugas de fluido en asientos según la norma ANSI/FCI 70-2-2006

8.1.9.1 Camisa de calefacción

Para los fluidos que exigen una temperatura mínima de trabajo (superior a la ambiente), por debajo de la cual se destruyen o se solidifican haciendo imposible el trabajo normal del proceso, es necesario disponer de camisas en el cuerpo o bien incluso en la tapa (tenga o no ésta fuelle de estanqueidad) para permitir la entrada continua de vapor de calefacción. Las conexiones de la camisa a la tubería de vapor son usualmente bridadas según normas DIN o ASA (figura 8.28).

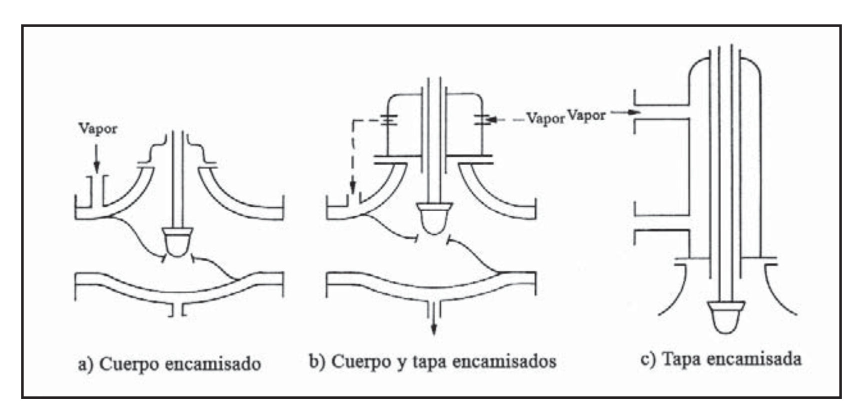
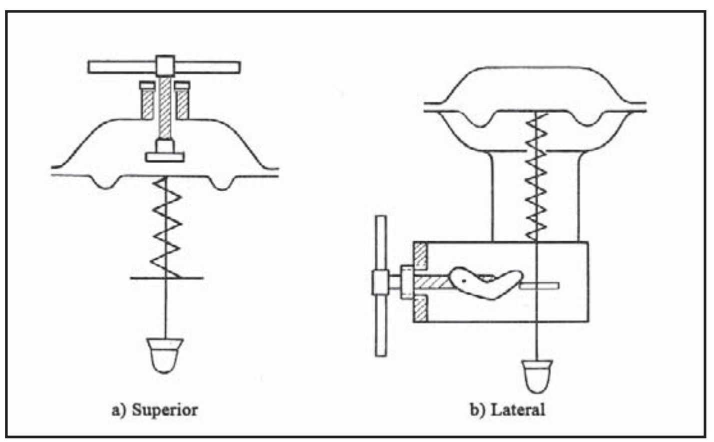


Figura 8.28 Camisa de calefacción de la válvula

8.1.9.2 Volante de accionamiento manual

El *volante de accionamiento manual* (figura 8.29) se utiliza en los casos en que se exige la máxima seguridad de funcionamiento de una instalación y el proceso debe continuar trabajando, independientemente de las averías que puedan producirse en el bucle de control; es necesario mantener un control de la apertura de la válvula en condiciones de fallo de aire.

El volante de accionamiento manual permite realizar esta función; puede ser superior o lateral.



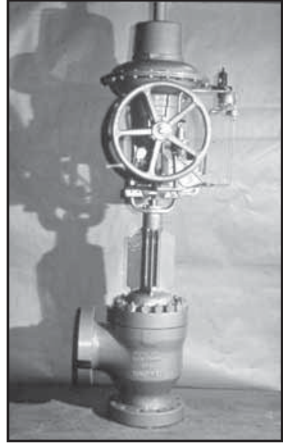


Figura 8.29 Volante de accionamiento manual

8.1.9.3 Repetidor

El *repetidor* o *booster* (figura 8.30) reduce el tiempo de transmisión de la señal en el bucle de control. Los retardos en la transmisión del controlador a la válvula son debidos a la resistencia interna del controlador, a la capacidad y resistencia del tubo de conexión y a la gran capacidad del servomotor de la válvula. El repetidor es esencialmente un convertidor *P/P* (presión neumática a presión neumática), de razón 1:1, alimentado con aire con un volumen de entrada muy pequeño y con una gran capacidad de entrega de caudal de aire.

Estas características le permiten aumentar varias veces la velocidad de apertura o de cierre de la válvula al suprimir, prácticamente, la gran capacidad de ésta. Como dato orientativo puede indicarse que una válvula de 1" dotada de repetidor sólo necesita 1,5 segundos para efectuar su carrera completa, mientras que una de 2" necesita 6 segundos.

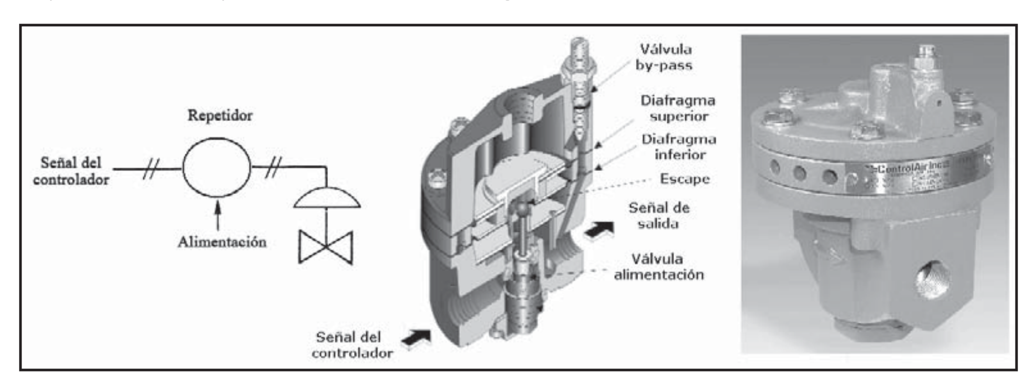


Figura 8.30 Repetidor (booster)

8.1.9.4 Microrruptores de final de carrera y transmisores de posición

Los *microrruptores de fin de carrera* (figura 8.31) están colocados en el yugo de la válvula y son excitados por una pequeña palanca fijada al vástago. Pueden ser electromecánicos y de proximidad,

y permiten la señalización a distancia en el panel de control, de la apertura, del cierre o del paso por una o varias posiciones determinadas del obturador de la válvula.

Revelan estos puntos con mucha mayor seguridad que la simple indicación de la señal de salida del controlador leída en un manómetro situado en el panel de control: no presentan la posibilidad de una avería en la línea neumática y no poseen el error dinámico inherente a la transmisión de la señal del controlador a la válvula.

El detector de proximidad es un elemento de estado sólido que contiene un oscilador. Éste es amortiguado cuando se aproxima a una placa metálica cambiando su señal de salida. Puede montarse lateralmente en la válvula de control y excitar relés, alarmas, etc.

Los *transmisores de posición* (figura 8.31) transmiten la posición del vástago (y, por lo tanto, el grado de apertura de la válvula) al panel de control para información del operador, o para realizar alguna acción de control. Los transmisores de posición neumáticos son idénticos a los posicionadores, mientras que los electrónicos o eléctricos contienen un reóstato, conectado al vástago de la válvula que actúa como divisor de tensión y que proporciona una señal de 4-20 mA c.c. proporcional a la posición de la válvula.

En lugares donde el entorno es agresivo (vibraciones y choques extremos) se prefieren los transmisores de posición inductivos.

Los transmisores de posición optoelectrónicos disponen de un disco codificador Gray, o de alta resolución, que es explorado digitalmente mediante diodos de infrarrojos y fototransistores enviando una señal de 4-20 mA c.c.

El detector no tiene rozamiento, no produce chispas ni ruido eléctrico, es intrínsecamente seguro e insensible a vibraciones.

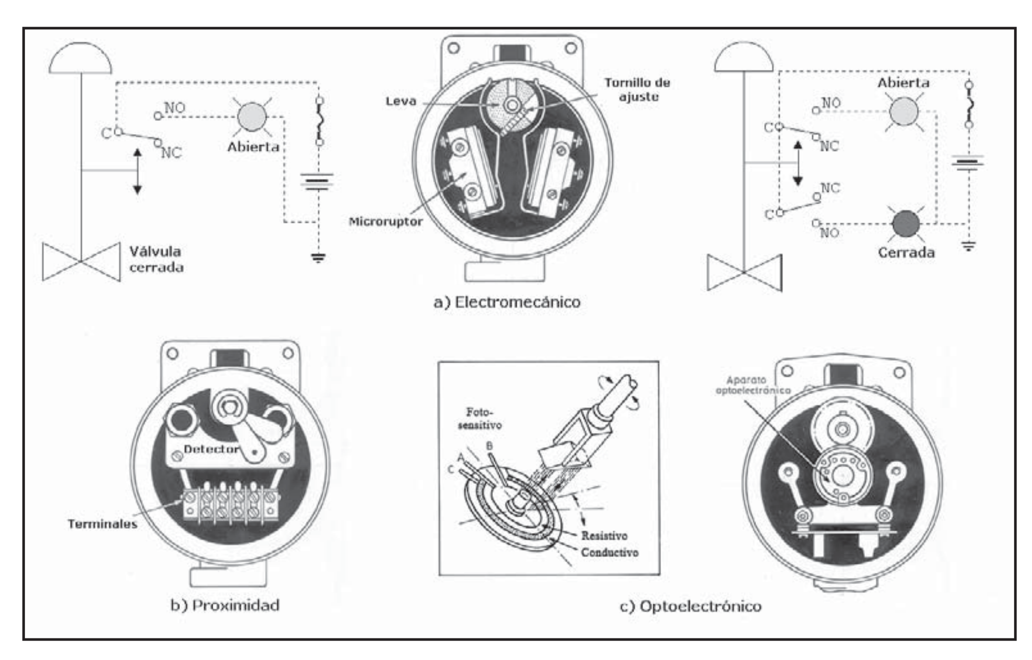


Figura 8.31 Microrruptores de fin de carrera (cortesía de Masoneilan)

8.1.9.5 Válvula de enclavamiento

La *válvula de enclavamiento* (figura 8.32) se utiliza cuando el proceso requiere el mantenimiento de la señal neumática en el servomotor en el último valor que tenía antes de que se produjera algún fallo en el suministro de aire.

Bloquea, automáticamente, el aire entre el controlador y la válvula de control cuando la presión del aire de alimentación disminuye por debajo de un valor prefijado.

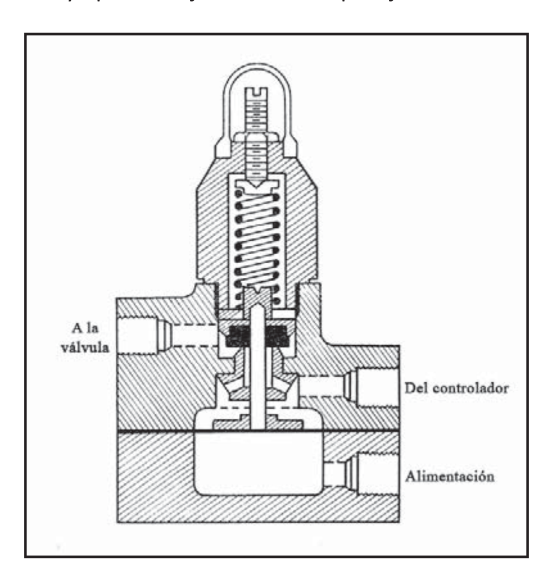


Figura 8.32 Válvula de enclavamiento

8.1.9.6 Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables

La válvula de K_v o C_v ajustables (figura 8.33) permite variar la capacidad volumétrica de la válvula. En estas válvulas, el coeficiente C_v o K_v es ajustable con una relación que llega a 100:1, manteniendo la misma señal de control de 4-20 mA c.c., o 0,2-1 bar, en toda la carrera ajustada de la válvula, aumentando así la sensibilidad y, por lo tanto, la resolución.

En otras palabras, puede variarse la ganancia de la válvula:

$$\frac{Variación\ de\ carrera}{Variación\ de\ la\ señal\ de\ control\ (16\ mA\ c.c.\ o\ 0{,}8\ bar)}$$

Adaptándola así al proceso, lo que facilita que el controlador regule con una menor banda proporcional y una menor acción integral, aumentando así la estabilidad del lazo de control. La variación del C_v o K_v está dentro de la relación 100:1.

En el caso de válvulas de microflujo para muy pequeños caudales, el C_v puede variarse desde 0,0016-0,004 hasta 1,5-3,8, y para válvulas de mayor tamaño la variación abarca desde 45 a 2.800.

Estas válvulas eliminan el sobredimensiondo que puede producirse si los datos para el cálculo del coeficiente C_v o K_v son erróneos y se selecciona una válvula mayor de la necesaria.

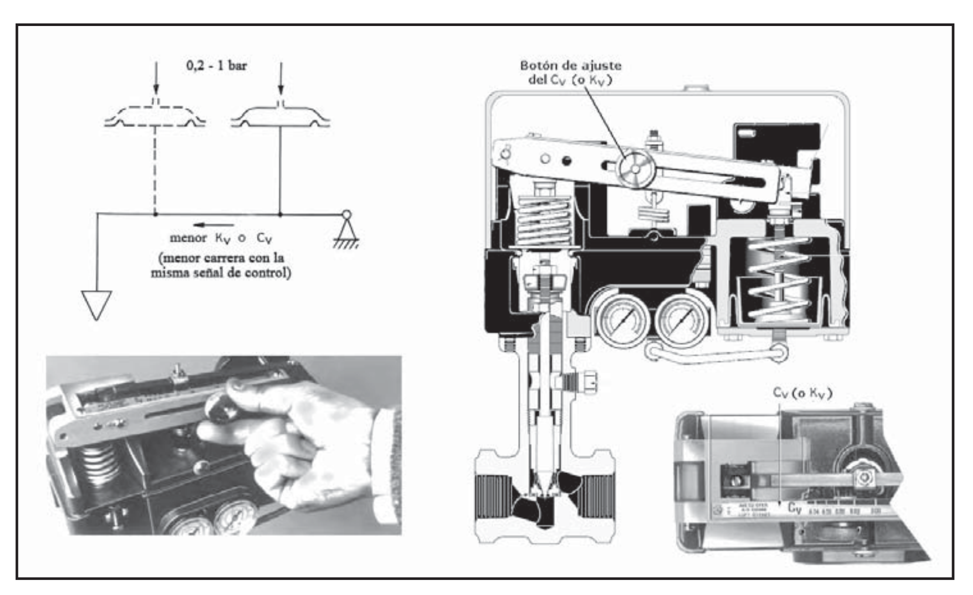


Figura 8.33 Válvula de K_v o C_v ajustables. Fuente: Varipak Masoneilan

8.1.9.7 By-pass (manifold)

Cuando la válvula de control deja de funcionar por avería (agarrotamiento, objeto extraño entre el obturador y el asiento, fallo de aire o de la señal de instrumentos), es útil el *by-pass* o *manifold* formado por un conjunto de válvulas auxiliares, tuberías y accesorios, que permite derivar el caudal de paso a una tubería en paralelo dotado de una válvula manual de control, es decir, con una curva característica lineal o isoporcentual adecuada para que el operario pueda realizar el control del proceso.

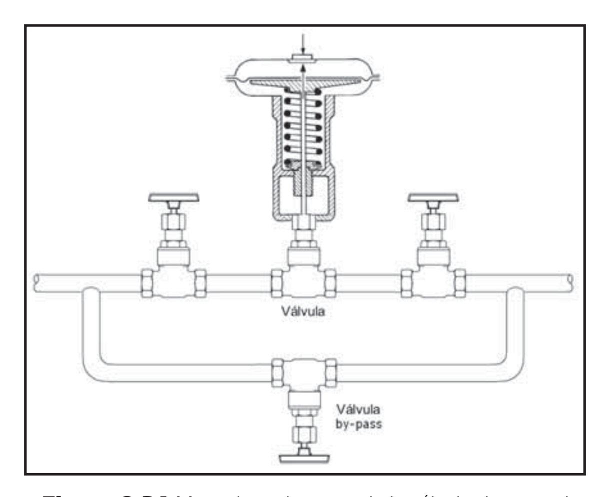


Figura 8.34 Montaje en by-pass de la válvula de control

El *by-pass* o *manifold* suele consistir en:

- Una *válvula de bloqueo* antes y otra después de la válvula de control.

- Un "*by-pass*" o "*derivación en paralelo*" con válvula de accionamiento manual alrededor del conjunto.
- Los codos, tes, reductores y accesorios que puedan ser necesarios en el montaje.

Las válvulas de bloqueo han de ser del tamaño de la línea o, por lo menos, mayores que la válvula de control.

8.1.9.8 Posicionador

Las fuerzas de desequilibrio que actúan en la válvula de control influyen en la posición del vástago de la válvula y hacen que el control sea errático e incluso inestable. Estas fuerzas, que ya fueron estudiadas en los servomotores neumáticos, son esencialmente las siguientes:

1. Fuerza de rozamiento del vástago al deslizarse a través de la empaquetadura, variable según el vástago esté en movimiento o parado y según el estado de su superficie.
2. Fuerza estática del fluido sobre el obturador, que depende de la presión diferencial existente, o sea, del grado de abertura de la válvula y de las presiones anterior y posterior a la misma.

Estas fuerzas pueden compensarse empleando el *posicionador*. Esencialmente, es un controlador proporcional de posición con punto de consigna procedente del controlador, variable entre 0,2 a 1 bar (3 a 15 psi según sea la señal estándar adoptada).

El posicionador compara la señal de entrada con la posición del vástago y, si ésta no es correcta (existe una señal de error), envía aire al servomotor o bien lo elimina en el grado necesario para que la posición del vástago corresponda exactamente, o bien sea proporcional, a la señal neumática recibida; en este último caso, el posicionador actúa además como un amplificador, por ejemplo señal de entrada 3-9 psi, señal de salida 3-15 psi, es decir, la válvula efectuará toda su carrera para la señal 3-9 psi del controlador.

El *posicionador neumático* es generalmente un instrumento neumático del tipo de equilibrio de fuerzas (figura 8.35). La fuerza ejercida por un resorte de margen, comprimido por una leva unida al vástago de la válvula, se equilibra contra la fuerza con que actúa un diafragma alimentado neumáticamente por un relé piloto.

Por ejemplo, en la figura 8.35a, puede verse que cualquier aumento de la señal de salida del controlador de la variable o bien de la estación de mando manual según sea el caso, cambia la señal neumática del piloto, flexa el obturador A y permite la entrada de más aire a la cámara de la válvula. Al bajar el vástago, la nueva fuerza ejercida por el resorte de margen se equilibra con la ejercida por el diafragma del posicionador alimentado por el relé piloto.

Por el contrario, al disminuir la señal exterior, baja la señal del relé piloto y el obturador de escape B abre, permitiendo el escape de aire de la cámara de la válvula hacia la atmósfera; así sube el vástago hasta que se equilibran de nuevo las fuerzas.

La forma de la leva determina la relación entre la señal de entrada y la posición del vástago, y puede cambiar por completo la curva característica inherente de la válvula.

En la figura 8.35d se representan tres tipos de levas. La leva 1 no cambia la señal; la leva 2 cambia una característica lineal de la válvula a apertura rápida o bien transforma una característica de igual porcentaje a otra lineal; la leva 3 aproxima una característica lineal a una de igual porcentaje o bien un obturador de apertura rápida a uno lineal.

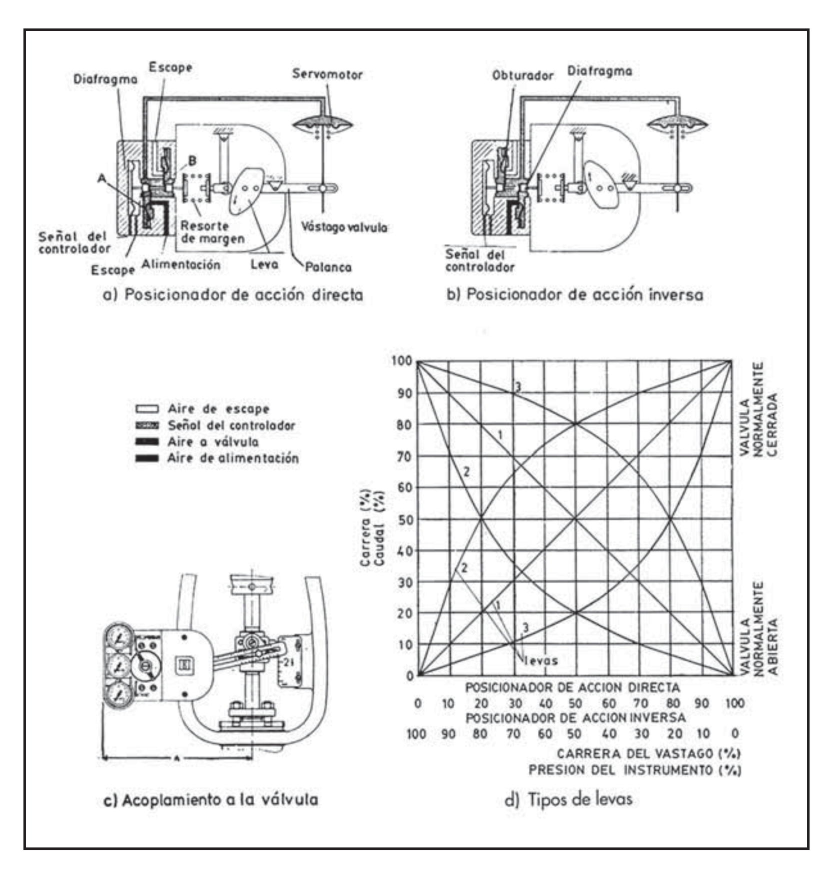


Figura 8.35 *Posicionador. Fuente: Honeywell*

El posicionador dispone, normalmente, de tres manómetros para indicar las presiones del aire de alimentación, de la señal procedente del controlador y de la señal de salida del posicionador a la válvula. Dispone también de una válvula *by-pass* que permite la conexión directa entre la señal procedente del controlador y la válvula. De este modo, es posible desconectar el posicionador para una eventual reparación en campo sin necesidad alguna de interrumpir el trabajo de la válvula. El posicionador también puede cambiarse fácilmente de acción, de directa a inversa o viceversa permitiendo así combinaciones entre el controlador y la válvula.

El posicionador descrito en la figura 8.35 es de simple acción. Existen *posicionadores de doble acción* (figura 8.36) para actuar sobre cilindros neumáticos o cámaras de válvula con señales dirigidas a la parte superior e inferior del pistón o del diafragma, respectivamente. Se llega a una posición de equilibrio cuando estas presiones son iguales. Cuando la señal del controlador es electrónica o digital, el propio posicionador puede contener un convertidor para pasar a señal neumática (figura 8.37).

En el *posicionador electroneumático* el transductor es del tipo de equilibrio de fuerzas y varía su presión de salida hasta que la fuerza, producida por el sistema de realimentación, equilibra la fuerza generada por la bobina electromagnética. Puede verse en la figura que la bobina está excitada por la señal de corriente del controlador y que la señal de salida neumática es siempre proporcional a la señal electrónica.

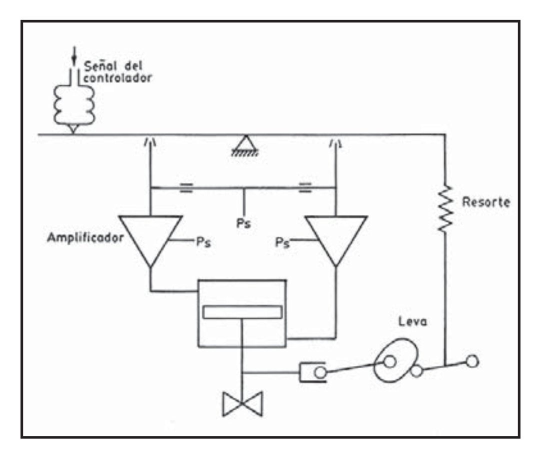


Figura 8.36 Posicionador de doble acción

El *posicionador electroneumático digital* funciona del modo siguiente: un motor paso a paso de c.c. es excitado por la señal de entrada en escalón y gira unos 200 pasos por revolución, con un total de 5 revoluciones para el campo de medida total. El eje del motor arrastra, en su giro, una tuerca que tensa un resorte. Éste actúa sobre el conjunto tobera-obturador y el relé piloto, alimentando la válvula a una señal neumática proporcional a la señal de entrada.

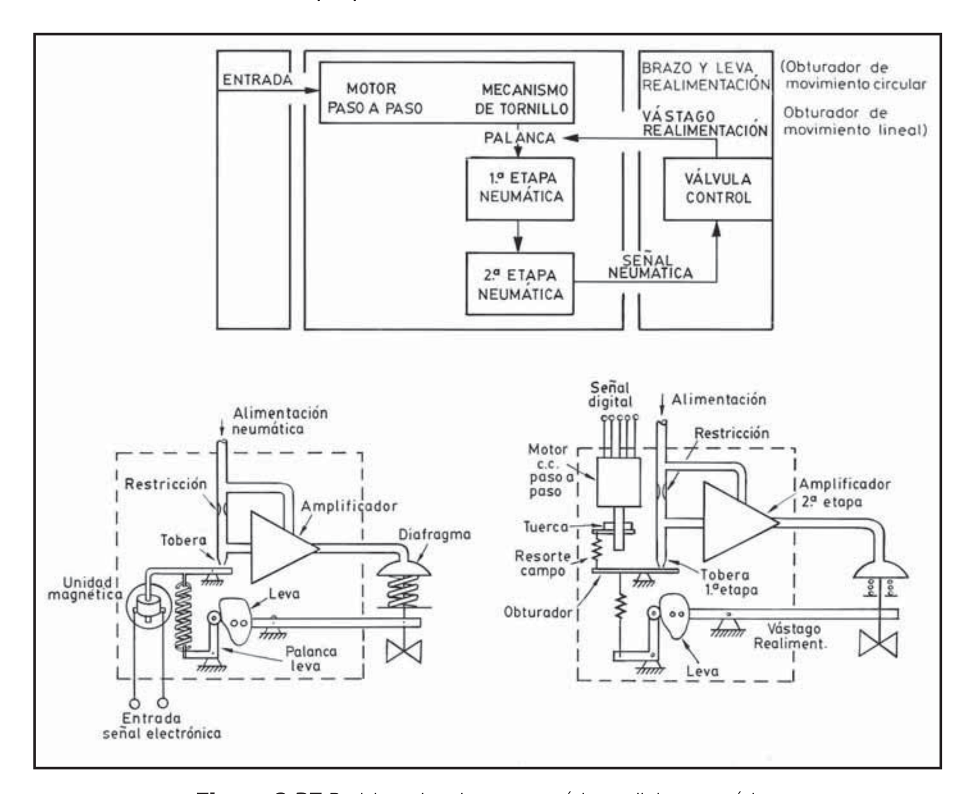


Figura 8.37 Posicionador electroneumático y digitoneumático

La realimentación es proporcionada por una palanca fijada al vástago de la válvula. La señal neumática a la válvula se mantiene en un valor fijo cuando el momento creado por el resorte del mecanismo de tornillo iguala el momento producido por el resorte de la palanca de realimentación. Este posicionador es muy sensible y cambia la posición de la válvula en ambos sentidos con sólo una variación en escalón del 0,05%.

El *posicionador inteligente* (figura 8.38) dispone de una interfaz con protocolos de comunicaciones *HART* (*Highway Addressable Remote Transducer*) o *Fieldbus FOUNDATION* (u otros) y de un microprocesador, lo que le permite realizar diversas funciones, aparte de la propia del posicionador que es la de posicionar el obturador de la válvula y convertir la señal de intensidad 4-20 mA c.c. a una señal neumática de salida hacia el servomotor neumático de la válvula.

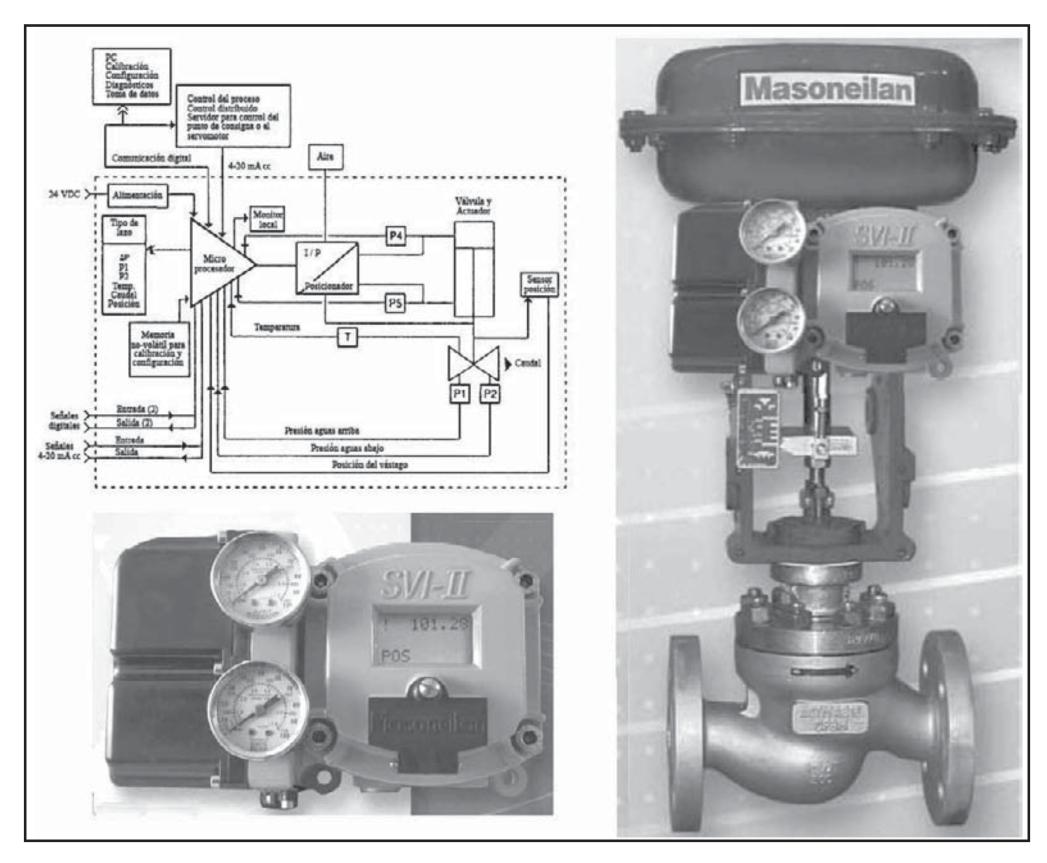


Figura 8.38 Posicionador inteligente. Fuente: Masoneilan

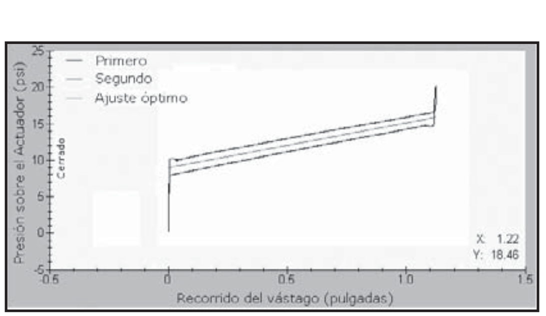
Dispone de las siguientes características:

- Operación, calibración y configuración locales y remotos.
- Ajuste automático del recorrido de la válvula.
- Ajuste de la fuerza de asentamiento del obturador de la válvula.
- Calibración del margen de recorrido del vástago.
- Controlador PID opcional con variables de entrada del proceso y punto de consigna remotos.

- Tiempos de respuesta ajustables por el usuario.
- Acción directa o inversa.
- Alta velocidad de respuesta.
- Compatibilidad con actuadores de acción directa (aire cierra) o inversa (aire abre).
- Configuración del cero y el *span* para operación con margen partido (*split range*).
- Caracterización de la válvula a las curvas lineal, isoporcentual, apertura rápida y personalizada por el usuario.
- Entradas adicionales para interruptores final de carrera (mecánicos e inductivos), válvulas de solenoide o sensores de posición remotos.
- Histórico de recorrido del vástago, número de ciclos, diagnóstico on-line.

El posicionador puede trabajar en áreas peligrosas con una instalación de seguridad intrínseca o a prueba de explosión. En ambos casos puede operarse, calibrarse y configurarse a nivel local mediante un visualizador digital y pulsadores a prueba de explosión o bien con un ordenador remoto con el software adecuado.

Como el posicionador conoce por retroalimentación la posición del vástago de la válvula, una función de diagnóstico incorporada permite conocer el estado del mantenimiento de la válvula, del actuador y del propio posicionador. De este modo, el servicio de mantenimiento, puede realizar su trabajo cuando sea realmente necesario al poder visualizar, a distancia, datos tales como el recorrido total del vástago desde la puesta en servicio de la válvula, el rozamiento de la estopada, la velocidad instántanea del vástago, el registro del tiempo de funcionamiento de la válvula, los datos históricos de calibración, la configuración de la válvula y la base de datos iniciales del fabricante.



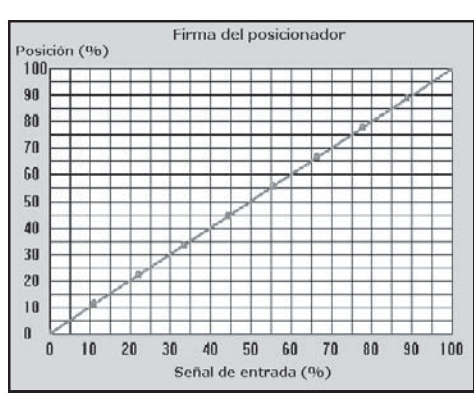


Figura 8.39 Gráfico de firma de la válvula. Fuente: Masoneilan

Esta función avanzada de mantenimiento predictivo permite averiguar el estado de la válvula sin desmontarla. La "firma" (figura 8.39), es decir, el registro gráfico del estado del conjunto válvula-actuador (respuesta a una entrada en escalón, medida de la histéresis, zona muerta y linealidad, gráficos o "firmas" del posicionador, del asentamiento, del actuador, de la presión de alimentación con relación al recorrido del vástago) puede compararse con "firmas previas" grabadas en la puesta en servicio y en estados posteriores para descubrir cambios en el funcionamiento de la válvula antes de que causen problemas reales en el control del proceso. También puede realizarse un diagnóstico del proceso y de las comunicaciones y un análisis de fallos. La información puede obtenerse directamente en la válvula, o a través de un ordenador personal o de una consola de operador en la sala de control.

Más de 200 problemas diferentes pueden ser detectados y evaluados, por ejemplo, fugas en la válvula, rozamientos, fallo de la empaquetadura, fallo del diafragma o del pistón, obturación del flitro regulador, desviaciones en el recorrido del vástago, válvulas pegadas a temperatura y presión, etc.

Las ventajas del posicionador digital frente al analógico se hacen evidentes comparando la exactitud ± 0,1% frente al 0,3%-2%, la estabilidad mejorada ± 0,1% frente al 0,175% y el campo de medida 50:1 frente a 10:1, además de la señal de salida que puede ser 4-20 mA c.c. o digital vía comunicaciones HART, Fieldbus, etc.

8.1.10 Válvula inteligente

La *válvula inteligente* (figura 8.40), aparecida gracias al desarrollo de los microprocesadores, contiene un controlador digital y sensores de medición de temperatura, caudal y presión montados en la propia válvula. El controlador digital controla la presión manométrica antes o después del orificio de la válvula, y la temperatura o el caudal, y envía la señal de salida al módulo del posicionador electroneumático acoplado al actuador. Cada válvula tiene grabada en una memoria ROM la variación del C_v correspondiente al intervalo 0%-100 % de abertura de la válvula y el valor del factor de recuperación C_f, lo que permite conocer y controlar el caudal que está pasando a través de la válvula gracias al microprocesador que calcula el caudal utilizando las fórmulas correspondientes. El software permite seleccionar la característica deseada de la válvula: lineal, igual porcentaje, apertura rápida y la que pueda especificar el usuario.

La válvula inteligente acepta la entrada del valor externo del punto de consigna y la comunicación digital a través de la interfaz RS-485 (u otra), con el protocolo de comunicaciones adecuado para comunicarse con los sistemas de control distribuido o integrado (HART, Fieldbus u otro). De este modo, accede a los valores de la variable de proceso, al punto de consigna y las alarmas.

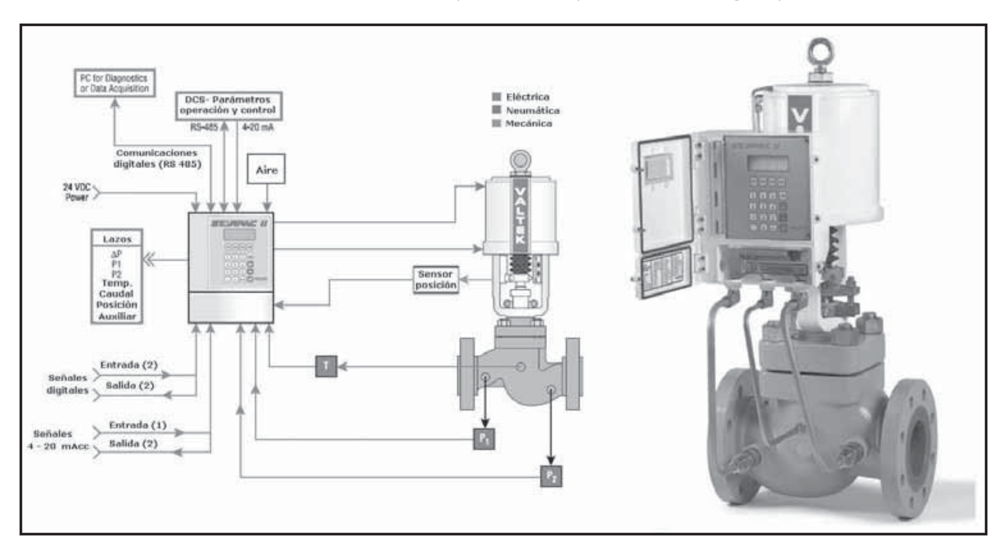


Figura 8.40 *Válvula inteligente. Fuente: Valtek International Inc.*

La válvula inteligente puede efectuar un diagnóstico de sí misma al medir la carrera del vástago y las presiones del actuador. Puede captar el excesivo rozamiento del vástago o el pegado de las partes internas. Además, permite llevar el proceso a una condición de seguridad en el caso de

problemas graves. Por ejemplo, si se pierde la comunicación con el control distribuido, el sistema puede ser programado para conducir la válvula a una posición de seguridad que impida la pérdida del material o para prevenir una condición de peligro para el operador de la planta.

Los datos de fabricación pueden ser facilitados por los fabricantes mediante posicionadores inteligentes montados en la válvula (de acceso local por teclado o mediante un protocolo de comunicaciones y un ordenador personal) que aportan las siguientes funciones:

- Lazo local de control PID, de ajuste manual o autosintonizable.
- Calibración automática de la válvula.
- Funciones de diagnóstico para el servicio de mantenimiento:
    - Caracterización de la curva característica de la válvula.
    - Rozamiento e histéresis de la válvula.
    - Longitud recorrida por el vástago de la válvula (odómetro).
    - Velocidad del vástago.
    - Análisis dinámico (respuesta ante una entrada en escalón).
    - Histórico de configuración y calibraciones de la válvula.
    - Datos de fábrica y funcionamiento (firmas).

8.1.11 Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes C_v y K_v

8.1.11.1 Definiciones

La necesidad universal de normalizar el cálculo de las dimensiones de las válvulas, no sólo en cuanto a tamaño sino también en cuanto a capacidad de paso del fluido, ha llevado a los fabricantes y a los usuarios a adoptar un coeficiente que refleja y representa la capacidad de las válvulas de control.

El primer coeficiente de dimensionamiento de válvula que se utilizó fue el denominado C_v que, empleado inicialmente en Estados Unidos, se define como:

> *"Caudal de agua en galones USA por minuto a la temperatura de 60 °F (15,5 °C) que pasa a través de la válvula en posición completamente abierta y con una pérdida de carga de una libra por pulgada cuadrada (psi)."*

En los países que emplean unidades métricas se suele utilizar, además, el factor de caudal K_v que la norma internacional IEC-534-1987 sobre *Válvulas de Control de Procesos Industriales* define del siguiente modo:

> *"Caudal de agua entre 5 °C y 30 °C en m^3/h que pasa a través de la válvula a una apertura dada y con una pérdida de carga de 1 bar (10^5 Pa) (1,02 Kg/cm^2)."*

El factor K_v para la válvula totalmente abierta se denomina K_{vs} mientras que el mínimo valor recibe el nombre de K_{v0}. Por lo tanto, la relación K_{vs} / K_{v0} es la denominada "*rangeabilidad*" o "*gama de caudales regulables*" que expresa la relación de caudales que la válvula puede controlar, o en otras palabras, la relación caudal máximo/caudal mínimo regulables por la válvula, entre cuyos límites la desviación de la curva característica no excede los límites establecidos. Esta desviación es más notable para el caudal mínimo (3% del caudal máximo en las lineales y 2% en las isoporcentuales) cuando la válvula está próxima a la posición de cierre.

En las válvulas de control isoporcentuales, esta relación suele valer 50 a 1 y en las lineales 30 a 1. Se aplica el criterio que la experiencia ha confirmado de la expresión:

$$Rangeabilidad = \frac{K_v\ (o\ C_v)\ al\ 100\%\ abertura}{K_v\ (o\ C_v)\ al\ 10\%\ abertura}$$

Con este criterio, la rangeabilidad de las válvulas lineales oscila alrededor de 10:1 y las isoporcentuales entre 20:1 y 50:1.

La equivalencia entre los coeficientes K_v y C_v para válvula totalmente abierta es:

K_v = 0,853 $\times$ C_v (m³/h)

C_v = 1,16 $\times$ K_v (galones por minuto)

8.1.11.2 Fórmula general

La válvula se comporta, esencialmente, como un orificio de paso variable que permite la circulación de un cierto caudal con una determinada pérdida de carga. Aplicando el teorema de Bernouilli en los puntos 1 y 2 de la figura 8.41 resulta:

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2}$$

Suponiendo fluidos incompresibles (líquidos) $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, luego:

$$V_2^2 - V_1^2 = 2 \times \frac{P_1 - P_2}{\rho}$$

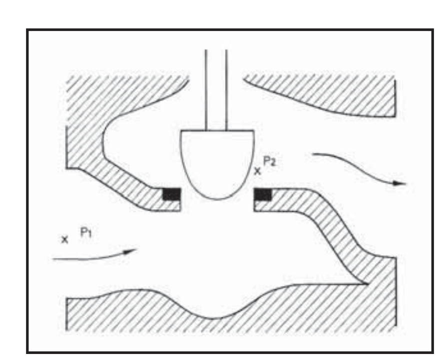


Figura 8.41 Válvula de control

Y, como V_2 es mucho mayor que V_1, queda:

$$V_2 = \sqrt{2 \times \frac{\Delta p}{\rho}} = \sqrt{2h}$$

en la que:

h altura de presión entre la entrada y salida de la válvula, en m., correspondiente a la diferencia de presión hidrostática equivalente.

Por otro lado, la forma de la válvula da lugar a una resistencia que disminuye la velocidad o el caudal.

Luego ésta es:

$$V = \beta\sqrt{2h}$$

siendo:

β = coeficiente de resistencia (sin dimensiones) y < 1

V = velocidad del fluido, en m/s

Y, como:

$$q = s \times V$$

siendo:

q = caudal a través de la válvula, en m^3/s

s = sección del orificio de paso, en m^2

Resulta:

$$q = s\beta\sqrt{2h} = s\beta\sqrt{2\times\frac{\Delta p}{\rho}} \;\; m^3/s \qquad (1)$$

en la que:

Δp = pérdida de carga en bar a través de la válvula (1 bar = 10^5 Pascal)

ρ = peso específico relativo, con relación al agua

Como por definición el coeficiente o factor de la válvula K_v corresponde al caudal en m^3/h para una pérdida de carga Δp = 1 bar y la densidad del agua entre 5 °C y 30 °C es de 1000 kg/m^3, resulta:

$$K_v = 3600 s\beta\sqrt{2} \;\; m^3/h = 5.091\, s\beta \;\; m^3/h \qquad (2)$$

Fórmula que permite determinar el contorno del obturador, ya que relaciona el caudal con la sección del área de paso. Sustituyendo la fórmula anterior en (1) resulta:

$$Q = \frac{K_v}{3600}\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \;\; m^3/s$$

O sea:

$$Q = K_v\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \;\; m^3/h$$

Y, de aquí:

$$K_v = Q\sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}$$

en la que:

Q = caudal máximo, en m^3/h

ρ = peso específico relativo, con relación al agua

Δp = pérdida de carga, en bar para el caudal máximo

Y, con el fin de utilizar la misma fórmula anterior para las unidades métricas (K_v) y americanas (C_v), se añade un factor N, cuyo valor dependerá de las unidades seleccionadas. Y así, considerando que C puede significar K_v o C_v, se tiene:

$$C = \frac{Q}{N_1}\sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}$$

Ejemplo:

Q = caudal máximo, en m^3/h o gpm (120 m^3/h o 528,34 gpm). Se aumenta en un 15%

ρ = peso específico relativo, con relación al agua = 0,9

Δp = pérdida de carga, en bar o psia para el caudal máximo (5 bar o 72,5 psia)

N_1 = factor de dimensionamiento (tabla 8.21).

$$K_v = \frac{Q}{N_1}\sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} = \frac{138}{1}\sqrt{\frac{0,9}{5}} = 58,6$$

O bien:

$$C_v = \frac{Q}{N_1}\sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} = \frac{607,6}{1}\sqrt{\frac{0,9}{72,52}} = 67,69$$

Con la relación:

$$C_v = \frac{C_v}{K_v} = \frac{67,69}{58,6} = 1,155$$

Lo que corresponde a la relación indicada anteriormente:

C_v = 1,16 K_v (galones por minuto)

8.1.11.3 Procedimientos de ensayo

La norma VDI/VDE 2173 describe los *procedimientos de ensayo* para la determinación práctica del coeficiente de la válvula. Sigue, a continuación, un estudio resumido de esta determinación.

La válvula de dos vías se instala en una estación de ensayo según la figura 8.42, formada por un conjunto de tuberías, un depósito de compensación de agua y una bomba que hace circular el agua en circuito cerrado. Las tuberías son comerciales, con las superficies internas lisas.

Para garantizar un régimen laminar, la longitud aguas arriba de la válvula (1) debe ser como mínimo 20 veces el diámetro interior de la tubería y aguas abajo del orden de 15 diámetros como mínimo.

Los puntos de toma de presión deben instalarse a 1 diámetro de la brida de entrada de la válvula y en la salida a 10 diámetros de la brida de la válvula. La presión diferencial se mantiene constante mediante el controlador (3) y la válvula (2).

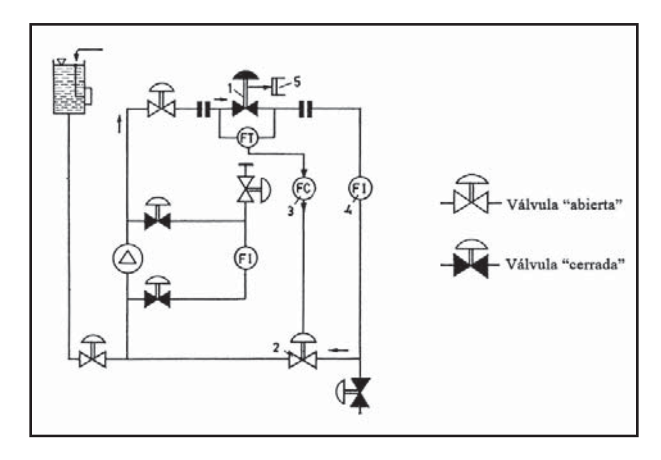


Figura 8.42 Estación de ensayo para válvula de dos vías

La carrera de la válvula se mide mediante un potenciómetro (5) y el caudal de paso con el medidor (4). Las válvulas marcadas en negro están en posición de cierre durante el ensayo.

En las figuras 8.43a y 8.43b pueden verse las estaciones de ensayo para válvulas de tres vías mezcladoras y 3 vías diversoras, respectivamente.

En las figuras 8.44a y 8.44b se muestran las estaciones para una válvula en ángulo: en la primera, el agua fluye contra el obturador lateralmente y, en la segunda, lo hace contra la parte superior del obturador.

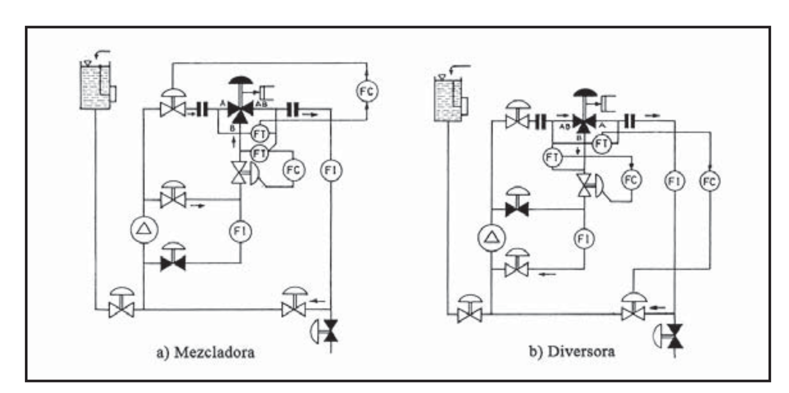


Figura 8.43 Estación de ensayo para válvula de 3 vías

Estas estaciones de ensayo permiten determinar el caudal Q (m³/h) que pasa a través de la válvula de control con una pérdida de carga Δp (bar), con lo cual permiten calcular el coeficiente de la válvula K_v para la válvula completamente abierta (K_{vs}) y determinar la curva característica inherente que relaciona el porcentaje K_v / K_{vs} con la relación de posiciones del vástago H / H_{100} de la válvula, siendo H_{100} la máxima apertura.

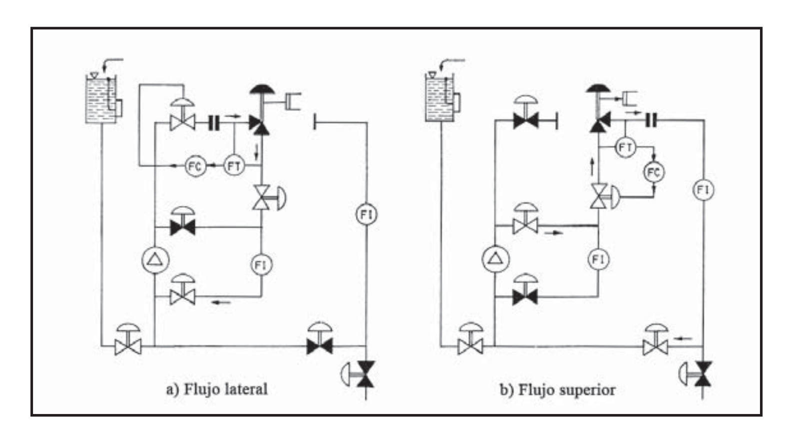


Figura 8.44 Estación de ensayo para válvula en ángulo

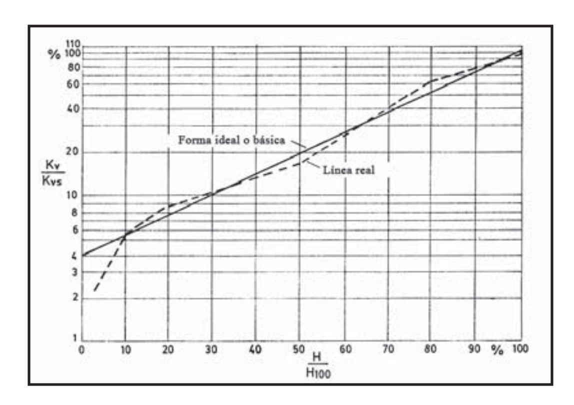


Figura 8.45 Curva característica real para una válvula de igual porcentaje

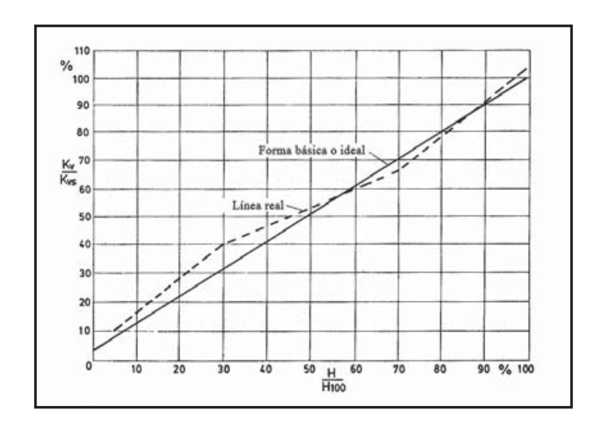


Figura 8.46 Curva característica real para una válvula lineal

En las figuras 8.45 y 8.46 pueden verse las curvas obtenidas para una válvula de igual porcentaje y otra lineal.

Los fabricantes admiten un ± 10% de desviación con relación al valor máximo de K_v. Además, el ángulo de desviación de la curva real, con relación al ángulo de la curva teórica, se fija con una tolerancia del 30%. Cuanta mejor calidad de fabricación tenga la válvula tanto menos se desviará su característica de la curva teórica.

8.1.11.4 Pérdida de carga

La válvula de control debe absorber, necesariamente, una pérdida de carga para poder mantener controlado el sistema en cualquier condición de operación.

Para calcular el K_v es necesario partir de datos tales como la pérdida de carga Δp, el caudal Q y el peso específico ρ y debe considerarse la viscosidad del fluido cuando ésta es alta.

La *caída de presión o pérdida de carga* Δp de la tubería debe ser aumentada cuando el campo de variación del caudal es amplio y debe ser reducida cuando las variaciones de caudal son pequeñas. Si la pérdida de carga provocada por la válvula es sólo un pequeño porcentaje de la pérdida total del sistema, la válvula pierde rápidamente su capacidad para aumentar ulteriormente el caudal. Cuando Δp es de valor adecuado, la válvula de control es más pequeña que el diámetro de la tubería donde está instalada. Si así no resultase en el cálculo, es necesario revisar los datos de partida y las operaciones efectuadas por si hay algún error y, en caso negativo, comprobar los datos de la línea del proceso.

La caída de presión o pérdida de carga Δp de la válvula es función de la pérdida total de la línea donde está instalada. Para seleccionar el valor de la pérdida de carga Δp de la válvula, deben evaluarse los factores que influyen en la presión disponible para la válvula y el coste de la propia instalación, es decir, la bomba de impulsión, si ésta existe, la tubería y la potencia consumida en la instalación.

Una regla práctica estándar es fijar la pérdida de carga en la válvula en un valor no menor del 30% de la pérdida total del sistema, si bien en los sistemas con alta caída de presión la experiencia ha demostrado que puede llegarse a admitir hasta un 15% de la pérdida total del sistema, siempre que las condiciones de operación no varían de forma extrema.

Por otro lado, desde el punto de vista de ahorro de energía, interesa reducir al máximo la pérdida de carga permitida para la válvula de control.

La potencia consumida por la válvula de control es:

$$Potencia\ (Kw) = 0{,}0266 \times \Delta P \times Q$$

siendo:

ΔP = pérdida de carga absorbida por la válvula, bar

Q = caudal, m^3/h

Esta potencia debe ser suministrada por la bomba centrífuga instalada en la tubería. Por ejemplo, una válvula por la que pasen 30 m^3/h de fuel de densidad 0,8 y que absorba una pérdida de carga de 3,5 bar, consume una potencia de:

$$Potencia\ (Kw) = 0{,}0266 \times 3{,}5 \times 30 = 2{,}8\ Kw$$

Las tablas de los fabricantes de válvulas de control indican un tamaño de válvula de 1½" para un coeficiente K_v calculado a partir de los datos anteriores.

Si se establece una menor pérdida de carga de 0,4 bar a través de la válvula, la bomba centrífuga tendrá un menor tamaño y consumirá una potencia de:

$$Potencia\ (Kw) = 0{,}0266 \times 0{,}4 \times 30 = 0{,}32\ Kw$$

El ahorro de energía es pues de 0,32 Kw/hora, lo que en un año de operación continua representa un ahorro de 0,32 × 24 × 365 = 2.800 Kw por cada bomba centrífuga que esté en serie con una válvula de control.

Aunque la válvula ha pasado ahora a un tamaño de 2", su coste queda amortizado por el ahorro que proporciona su selección.

Gracias al diseño mejorado, y al punto de vista de ahorro de energía, la pérdida de carga que puede considerarse es del 10% al 15% de la pérdida total del sistema para unas condiciones de operación normales.

Otras formas de fijar, con mayor exactitud, la pérdida de carga a través de la válvula consideran los factores siguientes:

1. Valor final de la pérdida de carga del sistema en el caso de que el caudal pase del normal de diseño al máximo previsto. Este incremento de resistencia es:

$$\Delta p\ sistema \times \left(\frac{Q_{max}}{Q_{normal}} \right)^2 - \Delta p\ sistema = \Delta p\ sistema \times \left[\left(\frac{Q_{max}}{Q_{normal}} \right)^2 - 1 \right]$$

   El desconocimiento de los datos de la planta aconseja adoptar un factor de seguridad del 10%, con lo que:

$$P\acute{e}rdida\ de\ carga = 1{,}1 \times \Delta p\ sistema \times \left[\left(\frac{Q_{max}}{Q_{normal}} \right)^2 - 1 \right]$$

2. Caída de presión admisible en el caso de un aumento del caudal. Se considera, en la práctica, un 5% de la diferencia entre las presiones de entrada (Pe) y salida (Ps) de la válvula de control valor al que se suma el 5% del nivel de presión de entrada del sistema (Pe).

$$P\acute{e}rdida\ de\ carga = 0{,}05 \times (Ps - Pe) + 0{,}05 \times Pe = 0{,}05\ Ps$$

3. Pérdida de carga producida por la propia válvula. De modo aproximado, la pérdida de carga producida por la propia válvula, suponiendo que la válvula sea de un tamaño inmediatamente inferior al de la tubería, y para velocidades normales del fluido es de:

Tipo de válvula	Pérdida de carga, bar
Simple asiento	0,70
Doble asiento	0,50
Obturador de jaula	0,30
Mariposa	0,01
Bola en V	0,07

Tabla 8.17 Pérdida de carga estimada a velocidad normal del fluido en válvulas de control

De este modo, la pérdida de carga requerida por la válvula es:

$$Pérdida\ de\ carga = 0,05 \times Ps + 1,1 \times \Delta p\ sistema \times \left[\left(\frac{Q_{max}}{Q_{normal}} \right)^2 - 1 \right] + \Delta p\ válvula$$

Veamos la justificación de estas reglas.

Sea el circuito de la figura 8.47 formado por una bomba de caudal Q y de presión de impulsión constante H, una tubería que absorba únicamente H_l y una válvula de control que tenga una pérdida de carga H_v. Es evidente que:

$$H = H_l + H_v$$

y que, por el circuito, fluirá un caudal menor que Q. Para reducir esta disminución de caudal puede bajarse el valor de H_v, o bien aumentar la presión total H del sistema.

Por motivos económicos, se acude a reducir la pérdida de carga en la válvula H_v, si bien será necesario comparar el coste total de la instalación y su mantenimiento con el mayor coste de la válvula, al ser ésta de mayor tamaño por causa de su baja pérdida de carga.

Del estudio efectuado en la deducción de la familia de curvas características efectivas puede considerarse la fórmula:

$$Q = K_v \sqrt{H_v} = K_l \sqrt{H_l} = K_e \sqrt{H}$$

siendo K_v, K_l y K_e los coeficientes válvula, tubería y equivalente, respectivamente. En el mismo estudio se determinaba:

$$K_e = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{K_v} \right)^2 + \left(\frac{1}{K_l} \right)^2}}$$

Por otro lado, el caudal máximo es:

$$Q_{max} = K_l \sqrt{H}$$

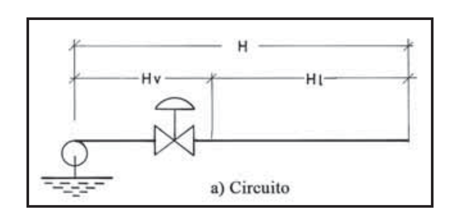
considerando que la válvula no existe en el sistema.

De este modo:

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \frac{Q}{K_l \sqrt{H}} = \frac{K_l \sqrt{H_l}}{K_l \sqrt{H}} = \sqrt{1 + \frac{H_v}{H}}$$

Por otro lado:

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \frac{K_e}{K_l} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{K_l}{K_v} \right)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\left(K_v / K_l \right)^2}}}$$



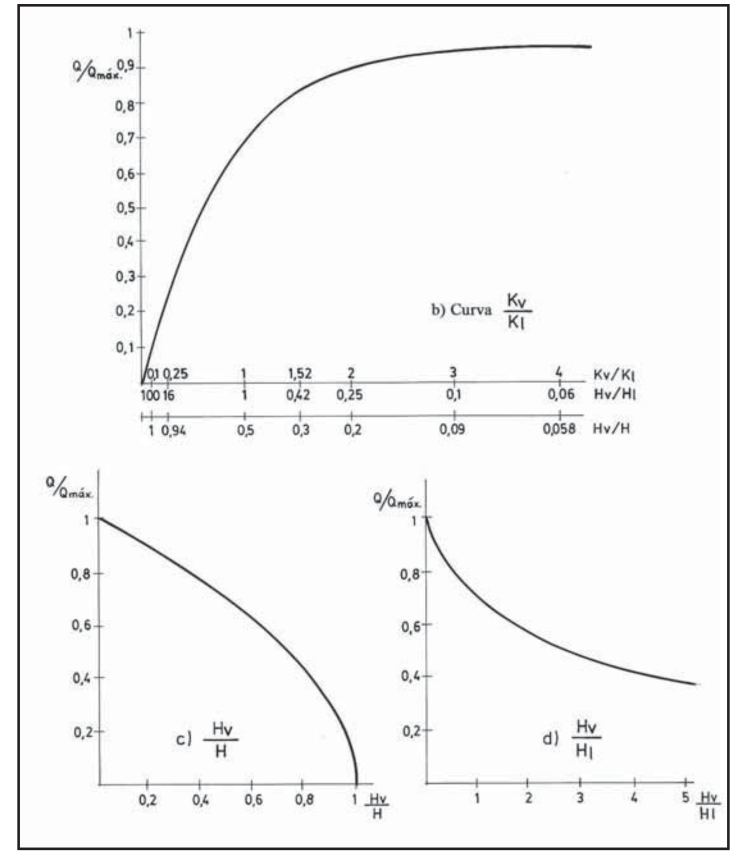


Figura 8.47 Circuito con válvula de control

O bien, como:

$$\frac{K_l}{K_v} = \sqrt{\frac{H_v}{H_l}}$$

Resulta:

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{H_v}{H_l}}}$$

O bien, como:

$$\frac{H_v}{H} = \frac{H_v}{H_v + H_l} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{H_v}{H_l}}}$$

Resulta:

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \sqrt{1 + \frac{H_v}{H_l}}$$

Estas tres ecuaciones están representadas en la figura 8.47b, 8.47c y 8.47d y de ellas, la más idónea para nuestro estudio es la 8.47b ya que presenta mayores variaciones de pendiente.

Puede verse fácilmente que, en la parte superior derecha de la curva, a partir del valor K_v / K_l = 2 la válvula no regula bien, puesto que debe existir mucha variación relativa para que Q / Q_{max} cambie apreciablemente. Por otro lado, a valores inferiores a K_v / K_l = 1, la válvula absorbe mucha pérdida de carga del sistema (50% al 100% leído en la escala de abscisas H_v / H) pudiendo sólo controlar hasta el 70% del caudal máximo, es decir, la válvula restringe demasiado la capacidad de caudal del sistema.

Por lo tanto, la zona idónea está comprendida entre 1 < K_v / K_l < 2,5, o bien, 0,15 < H_v / H < 0,5. Clásicamente se tomaba el valor intermedio H_v / H = 30% que correspondía a un porcentaje de caudal máximo aprovechable del sistema del Q / Q_{max} = 83,6%.

Con la pérdida de carga clásica del 30% de la pérdida de carga total del sistema, la idea de usar una bomba centrífuga de velocidad variable es atrayente. Sin embargo, si se aplicase del 5% al 15% de pérdida de carga, en particular en válvulas del tipo de vástago rotativo, se gasta menos energía en la válvula de control.

Por otro lado, los sistemas para controlar la velocidad de los motores eléctricos trabajan con convertidores de frecuencia que controlan el par y la velocidad de los motores de inducción y acoplan la curva de la bomba a la pérdida de carga del sistema, evitando pues la pérdida de carga de la válvula de control y su gasto de energía asociado.

Por otro lado, la bomba es lenta en respuesta dinámica y su sistema de control es más caro, así como sus eventuales reparaciones, y presenta impactos potenciales sobre el sistema eléctrico de distribución debido a los armónicos que produce. Además, si el controlador envía una señal de control baja, la bomba, al girar a pocas revoluciones, puede fácilmente calentarse en exceso y quemarse por poca ventilación. Algunas de las marcas en el mercado son Danfoss VLT 5000, Micromaster VFD y ABB VFD.

De modo que, en líneas generales, la válvula de control continúa siendo la preferida para el control de caudal de fluidos, aunque hay casos en los que el empleo de una bomba de velocidad variable es adecuado, tal como en el control de fluidos corrosivos que obligarían a usar aleaciones especiales en la válvula de control.

8.1.11.5 Caudal máximo

El *caudal máximo* de cálculo de la válvula de control debe ser el 115% del caudal máximo si este dato es conocido y el 150% si el dato del proceso es aproximado. Este aumento constituye un factor

de seguridad para evitar que la válvula tenga que regular en una posición extrema de completa apertura o próxima a ella.

Si se conocen los caudales normal y máximo, un criterio práctico es:

$$Caudal\ de\ cálculo = Caudal\ normal \times 1{,}43$$

$$Caudal\ de\ cálculo = Caudal\ máximo \times 1{,}1$$

De este modo, la válvula trabaja en los 2/3 de su carrera, que es la mejor zona de trabajo. Por otro lado, es conveniente verificar que al caudal máximo del proceso no se le hayan añadido factores de seguridad adicionales. Si fuera así, no es necesario aplicar el factor de seguridad indicado.

8.1.11.6 Densidad

En las fórmulas del caudal, el coeficiente de la válvula es proporcional a la raíz cuadrada de la *densidad*. Si en un líquido no se conoce la densidad real puede estimarse su valor con un efecto casi despreciable en el cálculo de la capacidad de la válvula. Por ejemplo, una densidad de 0,9 en lugar de 0,8 da lugar a un error menor del 5% en el caudal. En el caso de un gas, la densidad en condiciones normales de presión y temperatura (1 atmósfera y 15 °C) se calcula fácilmente dividiendo su peso molecular por 29.

8.1.11.7 Tamaño de la válvula

Cuando se selecciona una válvula existe el peligro de sobredimensionarla. En efecto, al establecer la capacidad de la válvula un 15% o un 50% superior al caudal máximo, y elegir su tamaño consultando las tablas del fabricante, se escoge la correspondiente al K_v o C_v superior al que resulta del cálculo. Esto hace que la válvula esté más sobredimensionada cuanto mayor sea el tamaño, siendo el promedio del 40%.

Por ejemplo, el K_v de una válvula de 3" es de 130 y el de una de 4" es de 235. Como consecuencia, la válvula queda sobredimensionada en: 1,25 × 1,4 = 1,75%, es decir, en un 75%. De este modo, la válvula regula el caudal máximo con sólo el 1/1,75 = 0,57 ≈ 60% de la amplitud de la señal de control, es decir, que sólo se aprovechará el intervalo de 0,2-0,68 bar. Se aprovecha, pues, sólo el 60%, con lo que aumenta la zona muerta de la válvula y, además, se incrementa su ganancia.

$$\frac{Variación\ de\ carrera}{Variación\ de\ la\ señal\ de\ control\ (0{,}68 - 0{,}2)}$$

Lo que empeora el control, al precisar de una ganancia más pequeña (banda proporcional mayor) y de un tiempo de acción integral más reducido. Una válvula con K_v o C_v ajustable, fija la señal de control integral (0,2-1 bar) a la carrera ajustada, aumentando la sensibilidad (la zona muerta disminuye) y reduciendo la ganancia del lazo de control, con lo que permite una menor banda proporcional y un mayor tiempo de acción integral, mejorando así el control.

En la figura 8.48 puede verse el gráfico comparativo entre una válvula de globo de 6" sobredimensionada (K_v = 340, C_v = 400) (curva A) y otra válvula de 6" con K_v ajustable (K_{vmax} = 470, C_v = 550) ajustado a K_v = 200 (C_v = 240) (curva B con leva lineal o curva C con leva isoporcentual).

Se observa en la figura 8.46 que la característica instalada de caudal es casi lineal, con lo que la ganancia del lazo de control es casi constante, lo que es sumamente beneficioso para el control.

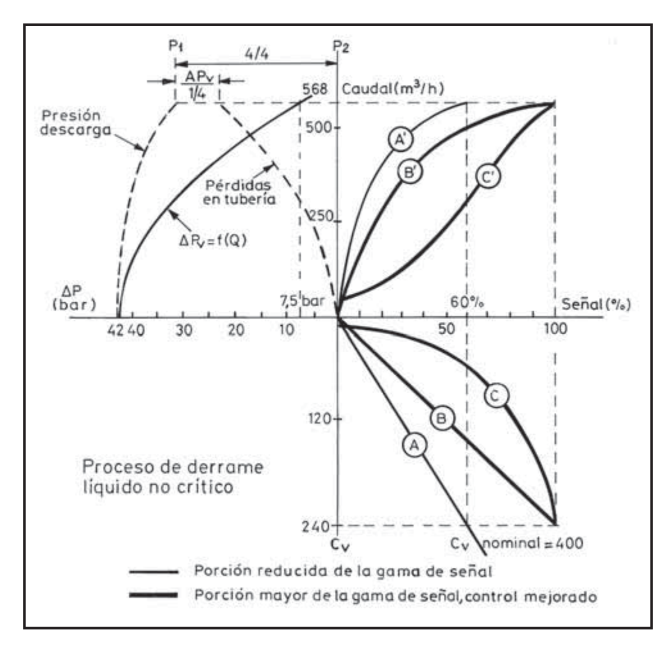


Figura 8.48 Comparación de una válvula sobredimensionada

8.1.11.8 Cálculo para líquidos

8.1.11.8.1 Generalidades

En los *líquidos* se aplica la fórmula general ya deducida, suponiendo inicialmente que el flujo es turbulento. Considerando que C puede significar K_v o C_v, según el valor de N_1 (tabla 8.19), se tiene:

$$C = \frac{Q}{N_1}\sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}$$

siendo:

- Q = caudal máximo, en m³/h o gpm
- ρ = densidad relativa con respecto al agua
- Δp = pérdida de carga, en bar, KPa o psia para el caudal máximo
- N_1 = factor de dimensionamiento (tabla 8.19)

8.1.11.8.2 Vaporización *(flashing)*

El líquido, de acuerdo con su presión y su temperatura, puede existir en estado líquido o de vapor. A temperaturas inferiores al punto de ebullición es un líquido y a temperaturas superiores es un vapor. Por otro lado, el punto de ebullición es función de la presión; cuanta más alta sea ésta, tanto mayor es la temperatura del punto de ebullición.

En algunas aplicaciones de las válvulas de control, el fluido existe antes de la válvula en estado líquido y aguas abajo en estado de vapor. Es evidente que en estas circunstancias se ha presentado una vaporización parcial o completa en alguna parte de la válvula por la estrangulación que ésta crea,

al existir en la salida una presión inferior o igual a la tensión de vapor del líquido a la temperatura de derrame. Es difícil precisar si, desde el punto de vista de cálculo el fluido, debe ser considerado como líquido o como vapor y, por lo tanto, no pueden aplicarse las fórmulas convencionales anteriores pero sí métodos empíricos que constituyen una aproximación a la solución del problema.

En un método se estima el grado de vaporización y se calculan dos coeficientes K_v, uno para el líquido y otro para el gas. La suma de los dos coeficientes es el K_v requerido. Este método es muy conservativo, ya que supone que el vapor existe en el líquido en el tramo anterior a la válvula cuando en la realidad se forma al pasar el líquido a través de la válvula y caer la presión. Asimismo, el método supone que el vapor y el líquido tienen la misma velocidad.

El fenómeno de la vaporización da lugar al paso de la mezcla líquido-vapor a gran velocidad a través de la válvula, con lo que el choque de gotas del líquido sobre el material de las paredes de la válvula y de la tubería erosiona la superficie, dando un aspecto mate y liso a la misma y provocando vibraciones de mucha menor importancia que en el fenómeno de la *cavitación*, que se describe a continuación.

8.1.11.8.3 Cavitación

En la estrangulación de la vena del líquido, llamada zona de vena contraída, el fluido alcanza su máxima velocidad y su mínima presión. Si en esta zona, la velocidad es suficiente, la tensión de vapor del líquido llega a ser inferior a la presión del vapor saturado, formando pues burbujas de vapor que colapsan (implosión) si a la salida de la válvula la presión es superior a la presión de saturación del líquido. Este fenómeno de formación continua de burbujas de vapor y su desaparición a la salida de la válvula recibe el nombre de *cavitación*.

El intercambio continuo entre la presión y la velocidad del líquido, a lo largo de su recorrido, a través de la válvula se denomina "recuperación de presión" y, tal como veremos, juega un papel importante en la determinación precisa del tamaño de la válvula cuando trabaja en estas condiciones.

La *cavitación* se inicia a presiones estáticas algo superiores a la tensión de vapor del líquido. Las cavidades que nacen dentro del líquido, y que colapsan súbitamente, limitan la capacidad de la válvula a partir de un determinado caudal crítico y pueden generar ruidos y vibraciones excesivos, con el peligro de causar daños mecánicos graves provocados por el impacto de las burbujas de vapor en implosión con alguna parte sólida de la válvula o de la tubería; la energía liberada por las burbujas es lo suficientemente grande como para destruir el material o la superficie de protección en poco tiempo. La cavitación debe evitarse y desaparece cuando la presión en la vena contraída es superior a la tensión de vapor.

En la figura 8.49 pueden verse las condiciones de presión con las que se presentan la vaporización y la cavitación y el aspecto de los daños por cavitación en las partes internas de la válvula.

En la figura 8.50 puede verse el grado de recuperación de presión que existe después de la válvula y que depende del tipo de la misma. Se aprecia que en el caso de un líquido, si la presión de salida es menor que su presión de vapor se presenta el fenómeno de la vaporización; pero si la presión, en la zona interna de la válvula donde el líquido alcanza su máxima velocidad, es menor que su presión de vapor y, al mismo tiempo, la presión de salida, debido a la recuperación de presión, es mayor que la presión de vapor del líquido, se forman burbujas de vapor en el interior de la válvula que colapsan a la salida apareciendo el fenómeno de la *cavitación*. La vaporización y la cavitación limitan el paso del líquido y el caudal no aumenta a pesar de que baje la presión de salida.

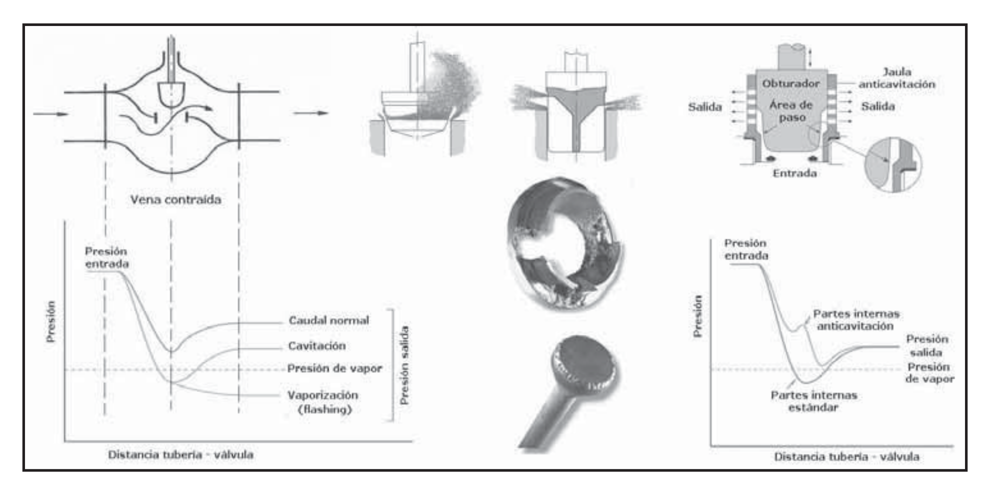


Figura 8.49 Vaporización y cavitación

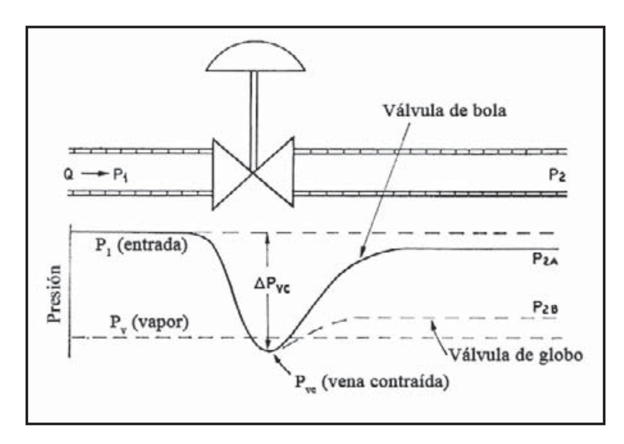


Figura 8.50 Recuperación de presión en dos tipos de válvulas

En el caso de un gas, tal como se verá más adelante, la disminución gradual de la presión de salida, manteniendo constante la presión de entrada, aumenta la velocidad del fluido en la vena contraída hasta alcanzarse la velocidad del sonido y, a partir de este punto, el caudal de gas no aumenta aunque baje más la presión de salida (*caudal estrangulado (chocked flow)*). Se está en condiciones de *caudal crítico* con una relación crítica $R_e = P_{vc} / P_1$ entre la presión en la vena contraída, en condiciones de estrangulamiento de caudal, y la presión de entrada del gas que, evidentemente, es menor que la relación crítica de presiones P_2 / P_1 entre la entrada y la salida. La condición de caudal crítico se alcanza, pues, antes de lo que sería previsible por la relación P_2 / P_1.

Los fenómenos descritos indican la necesidad de modificar el *caudal crítico aparente* afectándolo de un coeficiente de corrección para tener en cuenta la capacidad de recuperación de presión de la válvula. Cuanto mayor es ésta tanto más rápidamente se llega a las condiciones de *caudal crítico*.

En ensayos realizados con agua se determinó la curva que relaciona el caudal Q con la $\sqrt{\Delta p}$, siendo Δp la pérdida de carga a través de la válvula. Esta curva está representada en la figura 8.51, pudiendo observarse que su pendiente inicial es constante ya que corresponde a la fórmula:

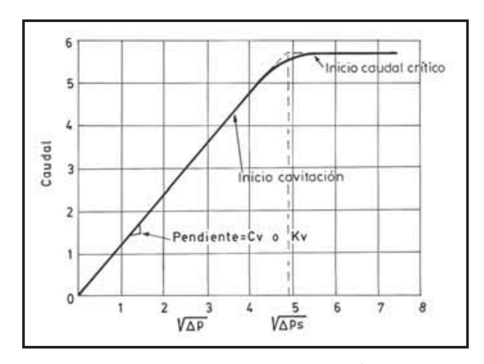


Figura 8.51 Curva de ensayo caudal-$\sqrt{\Delta p}$ para el agua

$$\frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} = K_v$$

Deducida de:

$$K_v = Q\sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}$$

Aumentando todavía más la pérdida de carga, la curva se transforma en horizontal lo que indica que se ha llegado a la condición de "*caudal estrangulado*" (*chocked flow*) (o *caudal crítico*), es decir, que una ulterior disminución de la presión posterior no aumenta el caudal.

La pérdida de carga donde se inicia la cavitación se denomina pérdida de presión crítica, y es:

$$\Delta p \ crítica = F_L^2 \times \left(P_1 - F_F \times P_v\right)$$

siendo:

F_L = factor de recuperación de presión sin conos reductores. Tiene en cuenta la forma geométrica interna de la válvula desde el punto de vista de su capacidad en condiciones de caudal crítico

F_F = factor de recuperación de presión del líquido sin conos reductores. Relación entre la presión en la vena contraída en condiciones de caudal crítico a la presión del vapor del líquido a la temperatura de entrada:

$$F_F = 0,96 - 0,28 \times \sqrt{\frac{p_v}{p_c}}$$

P_1 = presión de entrada

P_v = presión absoluta del vapor del líquido a la temperatura de entrada

Por lo tanto, si la pérdida de carga es menor que la anterior, se está en condiciones subcríticas.

Experimentalmente, se encontró en ensayos efectuados en aire y en agua que F_L se mantiene en valores coincidentes, tanto para líquidos en condiciones de vaporización o de cavitación como en gases con caudales críticos, lo cual indica que las válvulas presentan el mismo grado de recuperación de presión en los líquidos, en los gases o en los vapores.

Su expresión es:

$$F_L = \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_{vc}}}$$

siendo:

p_{vc} = presión en la vena contraída

El coeficiente F_L (*Factor de recuperación de presión*) depende de la forma geométrica de la válvula con relación al caudal crítico. Se define como la relación entre el caudal máximo real en condiciones de caudal crítico y el caudal teórico en condiciones que no son de caudal crítico, pero que serían las calculadas si la presión diferencial fuera la diferencia entre la presión de entrada de la válvula y la presión aparente en la vena contraída en las condiciones de caudal crítico.

Este factor F_L puede determinarse por ensayo de acuerdo con la norma ANSI/ISA–75.01.01–2002 (figura 8.52).

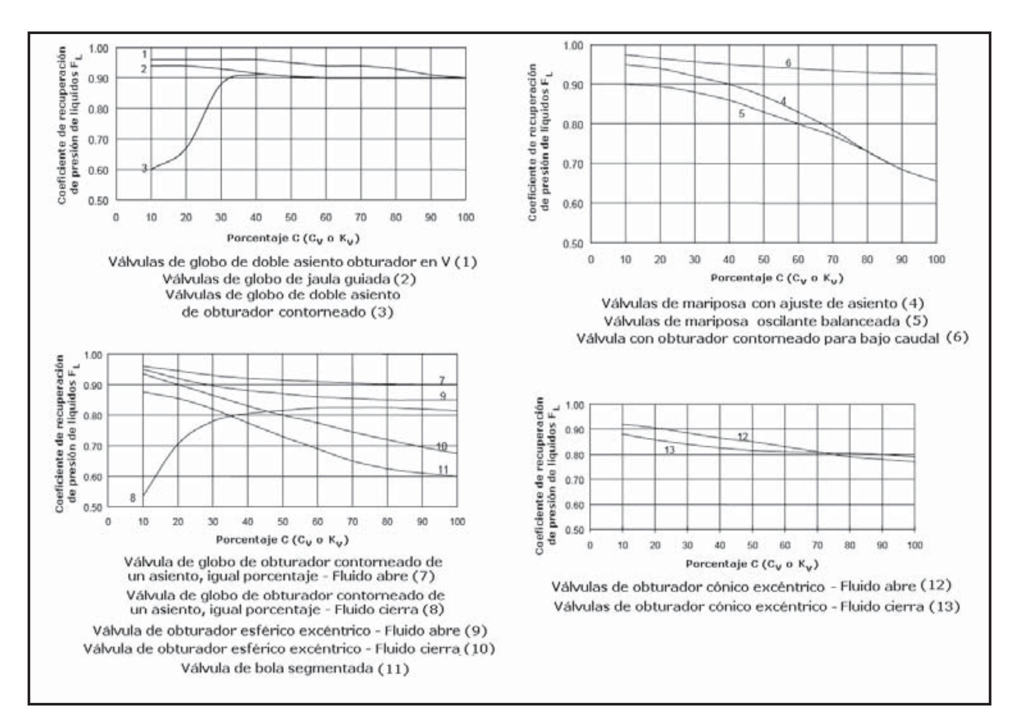


Figura 8.52 Coeficiente F_L de recuperación de presión en líquidos.
Fuente: ANSI/ISA–75.01.01–2002 (IEC 60534-2-1 Mod)

El factor de recuperación de presión del líquido sin conos reductores (F_F) tiene por expresión:

$$F_F = 0{,}96 - 0{,}28 \times \sqrt{\frac{p_v}{p_c}}$$

Puede verse en la figura 8.53.

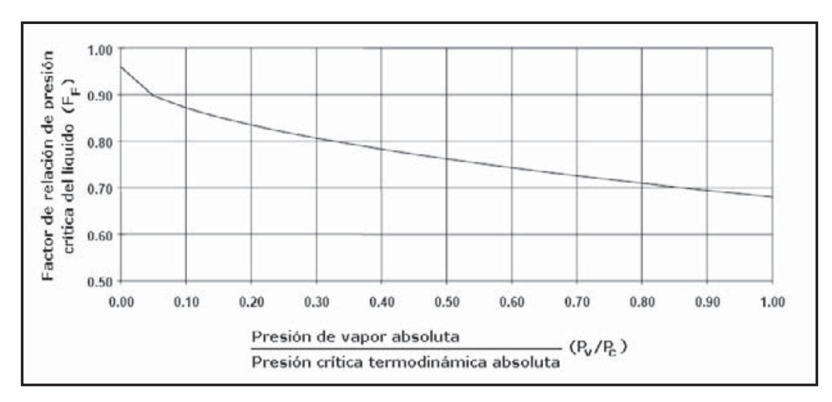


Figura 8.53 Factor F_F de relación de presión crítica en líquidos.
Fuente: ANSI/ISA–75.01.01–2002 (IEC 60534-2-1 Mod)

8.1.11.8.4 Flujo turbulento en líquidos

En condiciones de proceso en las que el líquido no vaporiza, el flujo es turbulento provocado por los obstáculos que el líquido encuentra (codos, forma interna de la válvula, etc.). Si el número de Reynolds es menor de 10.000, el flujo ya no es turbulento, sino que es laminar o está en una zona de transición (viscosidad elevada, etc).

Se presentan varias condiciones de funcionamiento:

1. Condiciones subcríticas sin conos reductores (líquidos)

Se verifica:

$$\Delta p \ crítica < F_L^2 \times \left(P_1 - F_F \times P_v\right)$$

Y la expresión del coeficiente de la válvula es:

$$C = \frac{Q}{N_1} \times \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}$$

Recordando que C puede significar K_v o C_v, según el valor del valor numérico N_1 (tabla 8.21).

EJEMPLO 1:

Válvula de globo obturador parabólico, fluido abre.

Tamaño de la válvula = 150 mm.

Agua a 90 °C, densidad 965 Kg/m^3, presión absoluta de entrada P_1 = 6,8 bar, presión absoluta de salida = 2,2 bar, caudal 310 m^3/h.

Presión de vapor: P_v = 0,701 bar.

Presión termodinámica crítica: P_c = 221,2 bar.

Viscosidad cinemática:

$$v = 3,26 \times 10^{-7} \ m^2 / s$$

Aumentamos el caudal en un 15%, Q = 356,5 m^3/h.

El factor de recuperación de presión del líquido sin conos reductores (F_F) vale:

$$F_F = 0{,}96 - 0{,}28 \times \sqrt{\frac{p_v}{p_c}} = 0{,}96 - 0{,}28 \times \sqrt{\frac{0{,}701}{221{,}2}} = 0{,}944$$

O bien consultando la figura 8.53.

El factor de recuperación de presión (tabla 8.18) es 0,9.

Comprobemos si las condiciones del proceso son críticas:

$$\Delta p\ crítica = F_L^2 \times \left(P_1 - F_F \times P_v\right) = 0{,}90^2 \times (6{,}8 - 0{,}944 \times 0{,}701) = 4{,}972\ bar > 4{,}6\ bar$$

Lo que confirma que las condiciones del fluido son subcríticas.

El coeficiente de la válvula es:

$$K_v = \frac{Q}{N_1} \times \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} = \frac{356{,}5}{1} \times \sqrt{\frac{0{,}965}{4{,}6}} = 160{,}4$$

$$C_v = \frac{Q}{N_1} \times \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} = \frac{1.569{,}6}{1} \times \sqrt{\frac{0{,}965}{66{,}7}} = 188{,}8$$

Falta comprobar si el fluido es turbulento o laminar, lo que depende del nº de Reynolds. Con los datos:

D = tamaño de la válvula = 150 mm

F_d = factor de modificación del tipo de válvula. En la tabla 8.18 se encuentra el valor 0,46

Es la relación:

$$\frac{d_H}{d_0} = \frac{Diámetro\ hidráulico\ de\ un\ paso\ de\ fluido\ (mm)}{Diámetro\ circular\ equivalente\ del\ área\ de\ flujo\ total\ (mm)}$$

Viscosidad cinemática v = 3,26 $\times$ 10^{-7} m^2/s.

F_R = factor de corrección del número de Reynolds (sin dimensiones)

Re_v = número de Reynolds (sin dimensiones)

F_L = factor de recuperación de presión en líquidos = 0,9 (tabla 8.18)

G = peso específico del líquido

Se obtiene:

$$Re_v = \frac{N_4 \times F_d \times Q}{v \times \sqrt{K_v \times F_L}} \times \sqrt[4]{\frac{F_L^2 \times K_v^2}{N_2 \times D^4} + 1} = \frac{0{,}0707 \times 0{,}46 \times 356{,}5}{3{,}26 \times 10^{-7} \times \sqrt{160{,}4 \times 0{,}9}} \times \sqrt[4]{\frac{0{,}9^2 \times 160{,}4^2}{0{,}0016 \times 150^4} + 1} = 2.960.027$$

Y, como es mayor que 10.000, el flujo es turbulento, lo que confirma que los cálculos anteriores son correctos.

2. Condiciones subcríticas con conos reductores (líquidos)

Cuando la válvula de control es de diámetro más pequeño que la tubería, conviene tener en cuenta el efecto de los conos reductores que conectan la tubería a la válvula de control, que dan lugar a una pérdida de carga adicional que proporciona un menor caudal con el mismo K_v (o C_v). Por este motivo, se usa un factor geométrico de tubería F_p para tener en cuenta esta influencia. El factor F_p es la relación entre el caudal de paso por la válvula con conos reductores al caudal que resultaría si la válvula de control se instalara sin conos reductores.

Y así, en condiciones subcríticas:

$$\Delta p \; crítica < \left(\frac{F_{LP}}{F_P}\right)^2 \times \left(P_1 - F_F \times P_v\right)$$

siendo:

F_{LP} = factor de recuperación de presión del líquido combinado con el factor de geometría de la tubería de la válvula de control con conos reductores

F_P = factor de geometría de la tubería de la válvula de control

La expresión del coeficiente de la válvula pasa a:

$$C = \frac{Q}{N_1 \times F_P} \times \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}$$

El factor de geometría de la tubería de la válvula de control F_p se determina en la figura 8.54 o bien consultando la tabla 8.18.

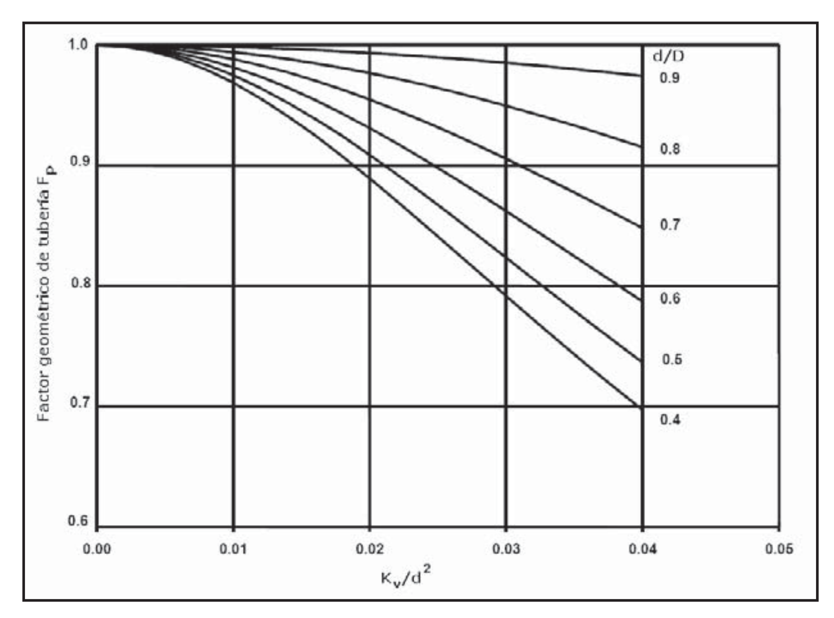


Figura 8.54 Factor de geometría F_P de la tubería de la válvula de control. Fuente: ISA 75.01.01-2002

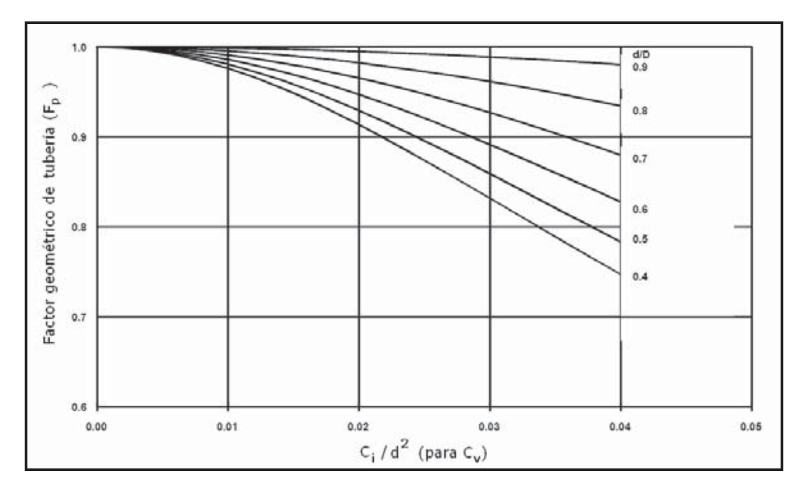


Figura 8.54 continuación *Factor de geometría F_P de la tubería de la válvula de control. Fuente: ISA 75.01.01-2002*

Un valor estimado del factor geométrico de tubería F_p es:

$$F_p = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sum \zeta}{N_2} \times \left(\frac{C}{d^2}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_{B1} - \zeta_{B2})}{N_2} \times \left(\frac{C}{d^2}\right)^2}}$$

La suma algebraica de los coeficientes ζ corresponde a los coeficientes de pérdida de carga efectiva de velocidad de todos los reductores asociados a la válvula de control, sin incluir la pérdida de velocidad de la propia válvula son:

Reductor de entrada:

$$\zeta_1 = 0,5 \times \left[1 - \left(\frac{d}{D_1}\right)^2\right]^2$$

Reductor de salida (expansor):

$$\zeta_2 = \left[1 - \left(\frac{d}{D_2}\right)^2\right]^2$$

Si los reductores (reductor + expansor) son de diferente tamaño se tienen los coeficientes de Bernouilli:

$$\zeta_{B1} = 1 - \left(\frac{d}{D_1}\right)^4 \qquad \zeta_{B2} = 1 - \left(\frac{d}{D_2}\right)^4$$

Los valores calculados de F_P proporcionan un coeficiente de caudal C ligeramente mayor del requerido, por lo que el cálculo debe ser iterativo, iniciándose con el cálculo de C para un flujo tur-

bulento subcrítico. El valor de F_P, determinado por ensayo según la norma ANSI/ISA-75.02-1996, tiene una exactitud del ± 5%.

3. Condiciones críticas sin conos reductores (líquidos)

Se verifica:

$$\Delta p\ crítica \geq \left(\frac{F_{LP}}{F_P}\right)^2 \times \left(P_1 - F_F \times P_v\right)$$

Y el coeficiente de caudal es:

$$C = \frac{Q}{N_1 \times F_L} \times \sqrt{\frac{\rho}{P_1 - F_F P_v}}$$

EJEMPLO 2:

Válvula de bola. Partes internas (bola segmentada), fluido abre. Tamaño de la válvula = 100 mm.

Agua a 90 °C, densidad 965 Kg/m^3, presión absoluta de entrada P_1 = 6,8 bar, presión absoluta de salida = 2,2 bar, caudal 310 m^3/h.

Presión de vapor P_v = 0,701 bar. Presión termodinámica crítica P_c = 221,2 bar.

Viscosidad cinemática ν = 3,26 × 10^{-7} m^2/s.

Aumentamos el caudal en un 15%, Q = 356,5 m^3/h.

El factor de recuperación de presión del líquido sin conos reductores (F_F) vale:

$$F_F = 0,96 - 0,28 \times \sqrt{\frac{p_v}{p_c}} = 0,96 - 0,28 \times \sqrt{\frac{0,701}{221,2}} = 0,944$$

O bien consultando la figura 8.53.

El factor de recuperación de presión F_L = 0,6 (tabla 8.18).

Modificador de estilo de válvula F_d = 0,98 (tabla 8.18).

Comprobemos si las condiciones del proceso son críticas:

$$\Delta p\ crítica = F_L^2 \times \left(P_1 - F_F \times P_v\right) = 0,60^2 \times (6,8 - 0,944 \times 0,701) = 2,21\ bar < 4,6\ bar$$

Lo que indica que las condiciones del fluido son críticas.

El coeficiente de la válvula es:

$$K_v = \frac{Q}{N_1 \times F_L} \times \sqrt{\frac{\rho}{P_1 - F_F \times P_v}} = \frac{356,5}{1 \times 0,6} \times \sqrt{\frac{0,965}{6,8 - 0,944 \times 0,701}} = 235,6$$

O bien:

$$C_v = \frac{Q}{N_1 \times F_L} \times \sqrt{\frac{\rho}{P_1 - F_F \times P_v}} = \frac{1.569,6}{1 \times 0,6} \times \sqrt{\frac{0,965}{98,6 - 0,944 \times 10,16}} = 272,4$$

Valores típicos de F_d (modificador de estilo de válvula), F_L (Factor de recuperación de presión en líquidos) y x_T (factor de relación de presión diferencial)					
Tipo de válvula	**Partes internas (trim)**	**Dirección del flujo**	**F_L**	**x_T**	**F_d**
Globo, simple asiento	3 V-port plug	Abre o cierra	0.9	0.70	0.48
	4 V-port plug	Abre o cierra	0.9	0.70	0.41
	6 V-port plug	Abre o cierra	0.9	0.70	0.30
	Obturador contorneado (lineal e igual porcentaje)	Abre	0.9	0.72	0.46
		Cierra	0.8	0.55	1.00
	Jaula perforada 60 orificios de igual diámetro	Centro de la jaula al exterior o del exterior al centro de la jaula	0.9	0.68	0.13
	Jaula perforada 120 orificios de igual diámetro	Centro de la jaula al exterior o del exterior al centro de la jaula	0.9	0.68	0,09
	Jaula caracterizada, 4 vías	Centro de la jaula al exterior o del exterior al centro de la jaula	0.9	0.75	0.41
			0.85	0.70	0.41
Globo, doble asiento	Obturador de paso total	Entrada entre los dos asientos	0.9	0.75	0,28
	Obturador contorneado		0.85	0.70	0,32
Globo en ángulo	Obturador contorneado (lineal e igual porcentaje)	Abre	0.9	0.72	0.46
		Cierra	0.8	0.65	1.00
	Jaula caracterizada, 4 vías	Centro de la jaula al exterior o del exterior al centro de la jaula	0.9	0.65	0.41
			0.85	0.60	0.41
	Venturi	Cierra	0.5	0.20	1.00
Globo, partes internas de tamaño reducido	Corte en V	Abre	0.98	0.84	0.70
	Asiento plano (carrera corta)	Cierra	0.85	0.70	0.30
	Aguja ahusada	Abre	0.95	0.84	N19*[(CFL)^0,5/Do]
Rotativo	Obturador esférico excéntrico	Abre	0.85	0.60	0.42
		Cierra	0.68	0.40	0.42
	Obturador cónico excéntrico	Abre	0.77	0.54	0.44
		Cierra	0.79	0.55	0.44
Mariposa (eje centrado)	Rotación de 70º	Cualquiera	0.62	0.35	0.57
	Rotación de 60º	Cualquiera	0.70	0.42	0.50
	Paleta estriada (70º)	Cualquiera	0.67	0.38	0.30
Mariposa de altas prestaciones (eje excéntrico)	Asiento compensado (70º)	Cualquiera	0.67	0.35	0.57
Bola	Orificio total (70º)	Cualquiera	0.74	0.42	0.99
	Bola segmentada	Cualquiera	0.60	0.30	0.98

Tabla 8.18 Valores de F_d (modificador de estilo de válvula), F_L (factor de recuperación de presión en líquidos) y x_T (factor de relación de presión diferencial)

Falta comprobar si el fluido es turbulento o laminar, lo que depende del nº de Reynolds. Con los datos:

D = tamaño de la válvula = 100 mm

F_d =factor de modificación del tipo de válvula =0,98 (tabla 8.18)

Viscosidad cinemática ν = 3,26 × 10^{-7} m^2/s

F_R = factor de corrección del número de Reynolds (sin dimensiones)

Re_v = número de Reynolds (sin dimensiones)

F_L = factor de recuperación de presión en líquidos = 0,6 (tabla 8.18)

$$Re_v = \frac{N_4 \times F_d \times Q}{\nu \times \sqrt{K_v \times F_L}} \times \sqrt[4]{\frac{F_L^2 \times K_v^2}{N_2 \times D^4} + 1} = \frac{0,0707 \times 0,98 \times 356,5}{3,26 \times 10^{-7} \times \sqrt{235,6 * 0,6}} \times \sqrt[4]{\frac{0,6^2 \times 235,6^2}{0,0016 \times 100^4} + 1} = 6.562.991$$

Y, como es mayor que 10.000, el flujo es turbulento, lo que confirma que los cálculos anteriores son correctos.

4. Condiciones críticas con conos reductores (líquidos)

Se verifica:

$$\Delta p\ crítica \geq \left(\frac{F_{LP}}{F_P}\right)^2 \times \left(P_1 - F_F \times P_v\right)$$

Y el coeficiente de caudal es:

$$C = \frac{Q}{N_1 \times F_{LP}} \times \sqrt{\frac{\rho}{P_1 - F_F P_v}}$$

8.1.11.8.5 Flujo no turbulento (laminar y de transición) en líquidos

Cuando la viscosidad del líquido es alta o la pérdida de carga es pequeña o el valor de C_v o K_v es bajo, el flujo puede ser de transición o laminar y se presenta cuando el número de Reynolds < 10.000.

El número de Reynolds se define como:

$$Re_v = \frac{N_4 \times F_d \times Q}{\nu \times \sqrt{C \times F_L}} \times \sqrt[4]{\frac{F_L^2 \times C^2}{N_2 \times D^4} + 1}$$

En la que:

D = tamaño de la válvula

F_d =factor de modificación del tipo de válvula (sin dimensiones)

F_R = factor de corrección del número de Reynolds (sin dimensiones). Se aplica cuando el número de Reynolds es menor de 10.000 (fluido viscoso o baja velocidad)

Re_v = número de Reynolds (sin dimensiones)

ν = viscosidad cinemática (centistokes)

F_L = factor de recuperación de presión en líquidos

En la figura 8.55 puede verse un gráfico que relaciona el factor de corrección del número de Reynolds (F_R) con el número de Reynolds (Re_v).

El cálculo del número de Reynolds Re_v requiere un proceso iterativo que se inicia considerando un flujo turbulento.

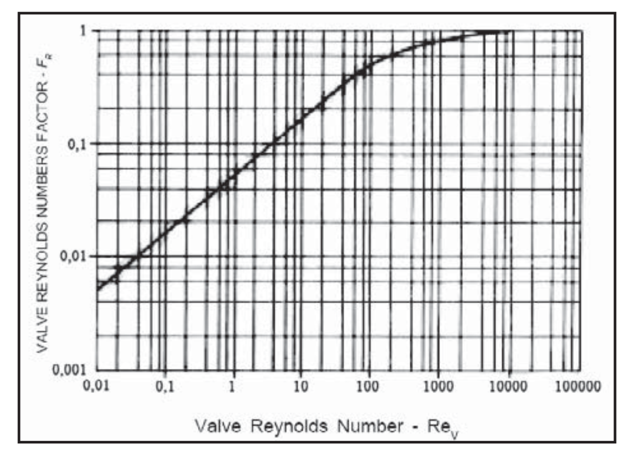


Figura 8.55 Relación entre el factor de corrección del número de Reynolds (F_R) y el número de Reynolds (Re_V). Fuente: Masoneilan

1. Flujo no turbulento sin conos reductores (líquidos)

El coeficiente de la válvula es:

$$C = \frac{Q}{N_1 \times F_R} \times \sqrt{\frac{\rho}{P_1 - P_2}}$$

2. Flujo no turbulento con conos reductores (líquidos)

Los conos reductores alteran el flujo laminar en la tubería, pero al no existir suficiente información sobre su influencia, se prefiere, para el cálculo de F_R, utilizar la fórmula del flujo no turbulento para válvulas del mismo tamaño que la tubería aunque se obtengan valores inferiores a los reales. Esto es debido a que el flujo laminar se va a retardar debido a la turbulencia adicional creada por los reductores y expansores. El usuario tenderá a aumentar el valor de F_R para un valor determinado del número de Reynolds.

8.1.11.9 Cálculo para gases y vapores

8.1.11.9.1 Generalidades

Los gases son fluidos en estado suficiente de sobrecalentamiento como para que puedan aplicárseles las leyes de los gases perfectos (aire, oxígeno, nitrógeno, argón, helio, etc.). El caudal de un fluido compresible (gas, vapor) varía en función de la relación entre la presión diferencial y la presión absoluta de entrada ($\Delta p/P_1$), representada por el símbolo x.

La fórmula del coeficiente de la válvula C, queda en:

$$C = \frac{Q}{N_9 \times P_1 \times Y} \sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{x}}$$

Con:

Q = caudal en las condiciones de servicio

P_1 = presión anterior absoluta

M = peso molecular del gas

Δp = presión diferencial (P_1 - P_2)

P_2 = presión posterior absoluta

T_1 = temperatura en grados Kelvin (°C + 273)

x = factor de relación entre la presión diferencial y la presión absoluta de entrada ($\Delta p/P_1$)

Y = factor de expansión del gas para tener en cuenta el cambio de densidad del gas al pasar el fluido desde la entrada a la vena contraída y el cambio en el área de la vena contraída al variar la presión diferencial

N_9 = factor de dimensionamiento, cuyo valor dependerá de las unidades seleccionadas

El *factor de expansión Y* es afectado por:

1. Relación del área de entrada del fluido y el área interior del cuerpo.
2. Perfil del flujo.
3. Factor de relación entre la presión diferencial y la presión absoluta de entrada ($x = \Delta p/P_1$).
4. Número de Reynolds (relación entre las fuerzas inerciales y viscosas existentes en el orificio de la válvula de control).
5. Relación de calores específicos γ (gamma).

El factor x_T engloba 1, 2 y 3. El factor F_K considera el factor 4. De este modo, el factor de expansión Y es:

$$Y = 1 - \frac{x}{3 \times F_\gamma \times x_T}$$

siendo:

x = factor de relación entre la presión diferencial y la presión absoluta de entrada ($\Delta p/P_1$)

x_T = factor de relación de presión diferencial de una válvula de control instalada sin reductores (tabla 8.18)

F_γ = factor de relación de calores específicos

Si la presión de entrada a la válvula se mantiene constante, y la presión de salida se va disminuyendo progresivamente, el caudal masa de gas aumentará hasta un límite, lo que se denomina *caudal crítico*. Una ulterior disminución de la presión de salida no va a producir ningún aumento de caudal.

Este límite se alcanza cuando la presión diferencial $x = F_\gamma \times x_T$, habiendo utilizando el criterio de velocidad límite del gas como la de velocidad Mach1 (velocidad del sonido):

$$\frac{P_1}{P_2} \geq \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}}$$

con:

P_1 = presión absoluta de entrada

P_2 = presión absoluta de salida

γ = relación de calores específicos del gas

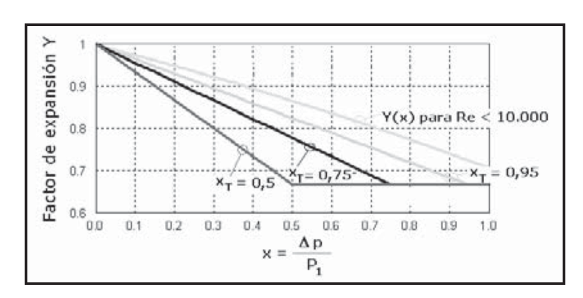


Figura 8.56 Factor de expansión Y

En la tabla 8.19 se muestran valores de γ y la relación P_1/P_2 para algunos gases típicos.

Gas	γ = cp/cv	Relación mínima P_1/P_2
Hydrogen	1,410	1,899
Methane	1,307	1,837
Propane	1,131	1,729
Butane	1,096	1,708
Ammonia	1,310	1,838
Chlorine	1,355	1,866
Sulfur dioxide	1,290	1,826
Carbon monoxide	1,404	1,895

Tabla 8.19 Relación de calores específicos (γ) y relación mínima de presiones absolutas (P_1/P_2) entre la entrada y la salida de la válvula para alcanzar el caudal crítico

En la condición de caudal crítico, el valor del factor de expansión pasa a ser de Y = 1 - (1/3) = 0,667. Luego, los límites de Y son de 0,667 y 1 para presiones diferenciales muy bajas.

Si la válvula de control se instala con reductores, esto influye sobre el valor de x_T y se considera otro factor x_{TP}, cuyo valor estimado es:

$$x_{TP} = \frac{\frac{x_T}{F_p^2}}{1 + \frac{x_T \times \zeta_1}{N_5} \times \left(\frac{C}{d^2}\right)^2}$$

en la que:

x_T = factor de relación de presión diferencial de una válvula de control instalada sin reductores (tabla 8.18)

$\zeta_i = \zeta_1 + \zeta_{B1}$, es decir, la suma de los coeficientes de pérdida de velocidad de entrada

Las fórmulas anteriores para gases no contienen un término que indique la densidad real del fluido en las condiciones de entrada y han aplicado las leyes de los gases perfectos. Estas leyes no son satisfactorias a partir de presiones superiores a 7 bar, por lo cual, en estos casos es necesario aplicar un factor de corrección de la densidad que se llama *factor de compresibilidad Z*.

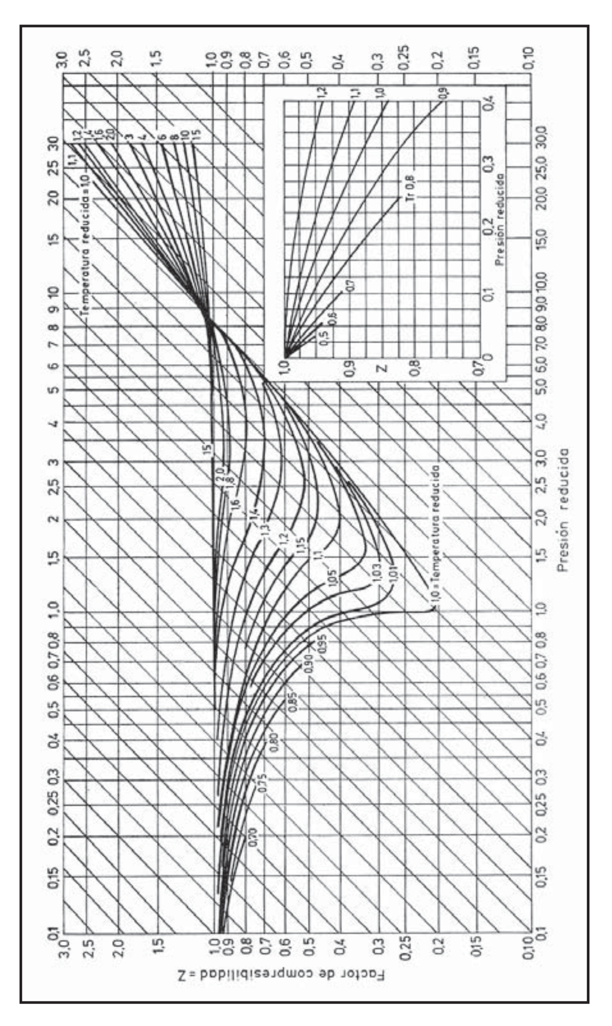


Figura 8.57 Factor de compresibilidad Z

El factor *Z* viene relacionado en función de la temperatura reducida y de la presión reducida, T_r y P_r, respectivamente, cuyos valores son:

$$P_r = \frac{Presión\ de\ entrada\ absoluta}{Presión\ crítica\ absoluta}$$

$$T_r = \frac{Temperatura\ de\ entrada\ absoluta}{Temperatura\ crítica\ absoluta}$$

En la tabla 8.20 pueden verse valores de temperatura reducida (T_r) y presión reducida (P_r) para varios gases.

Gas o vapor	Símbolo	M (peso molecular)	γ (Relación calores específicos)	F_γ (Factor de relación de calores específicos)	Pc (kPa) (presión crítica)	Tc (ºK) (temperatura crítica)
Acetileno	C_2H_2	26,04	1,30	0,929	6,14	309
Aire	–	28,97	1,40	1,000	3,771	133
Amoníaco	NH_3	17,03	1,32	0,943	11,4	406
Argón	A	39,948	1,67	1,191	4,87	151
Benceno	C_6H_6	78,11	1,12	0,800	4,924	562
Isobutano	C_4H_9	58,12	1,10	0,784	3,638	408
n-Butano	C_4H_{10}	58,12	1,11	0,793	3,8	425
Isobutileno	C_4H_8	56,11	1,11	0,790	4	418
Anhídrido carbónico	CO_2	44,01	1,30	0,.929	7,387	304
Monóxido de carbono	CO	28,01	1,40	1,000	3,496	133
Cloro	Cl_2	70,906	1,31	0,934	7,98	417
Etano	C_2H_6	30,07	1,22	0,871	4,884	305
Etileno	C_2H_4	28,05	1,22	0,871	5,04	283
Flúor	F_2	18,998	1,36	0,970	5,215	144
Freón 11 (tricloromonofluorometano)	CCl_3F	137,37	1,14	0,811	4,409	471
Freón 12 (diclorodifluorometano)	CCl_2F_2	120,91	1,13	0,807	4,114	385
Freón 13 (clorotrifluorometano)	$CClF_3$	104,46	1,14	0,814	3,869	302
Freón 22 (chorodifluorometano)	$CHClF_2$	80,47	1,18	0,846	4,977	369
Helio	He	4,003	1,66	1,186	229	5.25
n-Heptano	C_7H_{16}	100,20	1,05	0,750	2,736	540
Hidrógeno	H_2	2,016	1,41	1,007	1,297	33.25
Acido clorhídrico	HCl	36,46	1,41	1,007	8,319	325
Fluoruro de hidrógeno	HF	20,01	0,97	0,691	6,485	461
Metano	CH_4	16,04	1,32	0,943	4,6	191
Cloruro metílico	CH_3Cl	50,49	1,24	0,889	6,677	417
Gas natural	–	17,74	1,27	0,907	4,634	203
Neón	Ne	20,179	1,64	1,171	2,726	44.45
Óxido nítrico	NO	63,01	1,40	1,000	6,485	180
Nitrógeno	N_2	28,013	1,40	1,000	3,394	126
Octano	C_8H_{18}	114,23	1,66	1,186	2,513	569
Oxígeno	O_2	32,000	1,40	1,000	5,04	155
Pentano	C_5H_{12}	72,15	1,06	0,757	3,374	470
Propano	C_3H_8	44,10	1,15	0,821	4,256	370
Propileno	C_3H_6	42,08	1,14	0,814	4,6	365
Vapor saturado	–	18,016	1,25 – 1,32	0,893 – 0,943	22,119	647
Anhídrido sulfuroso	SO_2	64,06	1,26	0,900	7,822	430
Vapor sobrecalentado	–	18,016	1,315	0,939	22,119	647

Tabla 8.20 Presiones y temperaturas críticas de gases. Fuente: ANSI/ISA-75.01.01-2002 (IEC 60534-2-1 Mod)

8.1.11.9.2 Flujo turbulento en gases

1. Condiciones subcríticas sin conos reductores

Para que las condiciones sean subcríticas $x < F_\gamma \times x_T$:

$$C = \frac{Q}{N_9 \times P_1 \times Y}\sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{x}}$$

2. Condiciones subcríticas con conos reductores

Para que las condiciones sean subcríticas $x < F_\gamma \times x_T$:

$$C = \frac{Q}{N_9 \times F_p \times P_1 \times Y}\sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{x}}$$

EJEMPLO 3:

Válvula rotativa de obturador excéntrico rotativo, fluido abre.

Tamaño de la válvula = 50 mm.

Anhídrido carbónico a 160 °C. Peso molecular = 44,01 kg/kmol.

Presión absoluta de entrada P_1 = 6,8 bar; Presión absoluta de salida = 3,1 bar.

Caudal Q = 3.300 Nm^3/h a 1,01325 bar y 0 °C.

Presión de vapor P_v = 0,701 bar; Presión termodinámica crítica: P_c = 221,2 bar.

Viscosidad cinemática ν = 1,743 $\times 10^{-5}$ m^2/s.

Relación de calores específicos γ = 1,30.

Factor de compresibilidad Z = 0,988.

Tubería de entrada D_1 = 80 mm. Tubería de salida D_2 = 100 mm.

Conos reductores: cortos y concéntricos.

Factor de relación de presión diferencial x_T = 0,60 (tabla 8.18).

Factor de recuperación de presión del líquido F_L = 0,85 (tabla 8.18).

Modificador de estilo de válvula F_d = 0,42 (tabla 8.18).

Aumentamos el caudal en un 15%, Q = 3.795 Nm^3/h a 1,01325 bar y 0 °C.

El factor de relación de calores específicos es:

$$F_\gamma = \frac{\gamma}{1,40} = \frac{1,30}{1,40} = 0,929$$

Y, así:

$$x = \frac{\Delta p}{P_1} = \frac{6,8 - 3,1}{6,8} = 0,544$$

$$F_\gamma \times x_T = 0,929 \times 0,60 = 0,557$$

Como 0,544 < 0,557, las condiciones son subcríticas.

El factor de expansión Y es:

$$Y = 1 - \frac{x}{3 \times F_\gamma \times x_T} = 1 - \frac{0,544}{3 \times 0,929 \times 0,60} = 0,667$$

Falta comprobar si el fluido es turbulento o laminar, lo que depende del nº de Reynolds. Con los datos:

F_d = factor de modificación del tipo de válvula =0,42 (tabla 8.18)

Viscosidad cinemática: ν = 1,743 $\times$ 10^{-5} m^2/s

F_L = factor de recuperación de presión en líquidos = 0,85 (tabla 8.18)

$$Re_v = \frac{N_4 \times F_d \times Q}{\nu \times \sqrt{K_v \times F_L}} \times \sqrt[4]{\frac{F_L^2 \times K_v^2}{N_2 \times D^4} + 1} = \frac{0,0707 \times 0,42 \times 3.795}{1,743 \times 10^{-5} \times \sqrt{63,27 \times 0,85}} \times \sqrt[4]{\frac{0,85^2 \times 63,27^2}{0,0016 \times 80^4} + 1} = 891.176$$

Y, como es mayor que 10.000, el flujo es turbulento. Veamos la influencia de los conos reductores.

En el gráfico de la figura puede leerse el valor de F_P (factor de geometría de la tubería de la válvula de control) a partir de los coeficientes de pérdida de velocidad.

$$\frac{C}{d^2} = \frac{K_v}{d^2} = \frac{63,27}{50^2} = 0,0253$$

$$\frac{d}{D} = \frac{50}{100} = 0,5$$

Y, en el gráfico, se lee F_P = 0,86.

El valor de F_P también puede calcularse. Los valores calculados de FP proporcionan un coeficiente de caudal C ligeramente mayor del requerido, por lo que el cálculo debe ser iterativo, iniciándose con el cálculo de C para un flujo turbulento subcrítico. El valor de F_P, determinado por ensayo según la norma ANSI/ISA-75.02-1996, consigue una exactitud del ± 5%.

Se parte del valor inicial $F_{P(1)} = 1;\ C_1 = C = K_v.$

Valor del coeficiente de la válvula C (K_v):

$$K_v = \frac{Q}{N_9 \times F_p \times P_1 \times Y} \sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{x}} = \frac{3.795}{2.460 \times 1 \times 6,8 \times 0,667} \sqrt{\frac{44,01 \times 433 \times 0,988}{0,544}} = 63,27$$

El valor de F_P es:

$$F_p = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\zeta}{N_2} \times \left(\frac{C}{d^2}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_{B1} - \zeta_{B2})}{N_2} \times \left(\frac{C}{d^2}\right)^2}}$$

Los coeficientes reductores de la tubería son:

Reductor de entrada:

$$\zeta_1 = 0,5 \times \left[1 - \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 \right]^2 = 0,5 \times \left[1 - \left(\frac{50}{80} \right)^2 \right]^2 = 0,186$$

Reductor de salida (expansor):

$$\zeta_2 = \left[1 - \left(\frac{d}{D_2} \right)^2 \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{50}{100} \right)^2 \right]^2 = 0,563$$

Los coeficientes de Bernouilli, para reductores de entrada y salida de distinto diámetro, son:

$$\zeta_{B1} = 1 - \left(\frac{d}{D_1} \right)^4 = 1 - \left(\frac{50}{80} \right)^4 = 0,847$$

$$\zeta_{B2} = 1 - \left(\frac{d}{D_2} \right)^4 = 1 - \left(\frac{50}{100} \right)^4 = 0,938$$

Así, el efecto de los reductores, realizando un cálculo iterativo, resulta:

$$F_{p(2)} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sum \zeta}{N_2} \times \left(\frac{K_v}{d^2} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(0,186 + 0,563 + 0,847 - 0,938)}{0,0016} \times \left(\frac{63,27}{50^2} \right)^2}} = 0,89$$

Como:

$$\frac{F_{p(2)}}{F_{p(1)}} = \frac{0,891}{1} = 0,891 < 0,99$$

Es necesario realizar otra iteración. Y, así:

$$C_2 = \frac{C}{F_{p(2)}} = \frac{K_v}{F_{p(2)}} = \frac{63,27}{0,89} = 71,08$$

$$F_{p(3)} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sum \zeta}{N_2} \times \left(\frac{C_2}{d^2} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(0,186 + 0,563 + 0,847 - 0,938)}{0,0016} \times \left(\frac{71,08}{50^2} \right)^2}} = 0,866$$

Como:

$$\frac{F_{p(3)}}{F_{p(2)}} = \frac{0,866}{0,89} = 0,97 < 0,99$$

Es necesario realizar otra iteración:

$$C_3 = \frac{C}{F_{p(3)}} = \frac{K_v}{F_{p(3)}} = \frac{63,27}{0,866} = 73,06$$

$$F_{p(4)} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sum \zeta}{N_2} \times \left(\frac{C_3}{d^2}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(0,186 + 0,563 + 0,847 - 0,938)}{0,0016} \times \left(\frac{73,06}{50^2}\right)^2}} = 0,860$$

Como:

$$\frac{F_{p(4)}}{F_{p(3)}} = \frac{0,860}{0,866} = 0,993 > 0,99$$

De modo que $F_{P(4)}$ = 0,86 es el valor iterativo final de F_P.

El factor de relación de presión diferencial con conos reductores es x_{TP}.

Con los valores:

$$\zeta_1 = \zeta_1 + \zeta_{B1} = 0,186 + 0,847 = 1,033$$

$$x_{TP} = \frac{\frac{x_T}{F_p^2}}{1 + \frac{x_T \times \zeta_1}{N_5} \times \left(\frac{C_3}{d^2}\right)^2} = \frac{\frac{0,6}{0,86^2}}{1 + \frac{0,6 \times 1,033}{0,0018} \times \left(\frac{73,06}{50^2}\right)^2} = 0,627$$

Finalmente, el valor del coeficiente de la válvula:

$$K_v = \frac{Q}{N_9 \times F_p \times P_1 \times Y} \sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{x}} = \frac{3.795}{2.460 \times 0,86 \times 6,8 \times 0,667} \sqrt{\frac{44,01 \times 433 \times 0,988}{0,544}} = 73,58$$

3. Condiciones críticas sin conos reductores

Para que las condiciones sean críticas $x \geq F_\gamma \times x_T$:

$$C = \frac{Q}{0,667 \times N_9 \times P_1} \sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{F_\gamma \times x_T}}$$

4. Condiciones críticas con conos reductores

Para que las condiciones sean críticas $x \geq F_\gamma \times x_T$:

$$C = \frac{Q}{0,667 \times N_9 \times F_p \times P_1} \sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{F_\gamma \times x_{TP}}}$$

8.1.11.9.3 Flujo no turbulento (laminar y de transición) en gases

Cuando la pérdida de carga es pequeña, o el valor de C_v o K_v es bajo, el flujo puede ser de transición o laminar y se presenta cuando el número de Reynolds < 10.000.

El número de Reynolds se define como:

$$Re_v = \frac{N_4 \times F_d \times Q}{\nu \times \sqrt{C \times F_L}} \times \sqrt[4]{\frac{F_L^2 \times C^2}{N_2 \times D^4} + 1}$$

en la que:

D = tamaño de la válvula

F_d = factor de modificación del tipo de válvula (sin dimensiones) = relación entre el diámetro hidráulico del paso del flujo al diámetro de un orificio circular, cuya área, para un recorrido dado, es equivalente a la suma de las áreas de pasos de flujo idénticos. El fabricante lo expresa en función de la carrera de la válvula

F_R = factor de corrección del número de Reynolds (sin dimensiones). Se aplica cuando el número de Reynolds es menor de 10.000 (fluido viscoso o baja velocidad)

Re_v = número de Reynolds (sin dimensiones)

ν = viscosidad cinemática (centistokes)

F_L = factor de recuperación de presión

1. Flujo no turbulento sin conos reductores

Condición número de Reynolds < 10.000.

$$C = \frac{Q}{N_{22} \times F_R} \sqrt{\frac{M \times T_1}{\Delta p \times (P_1 + P_2)}}$$

Ejemplo 4:

Válvula de control con obturador de aguja para flujo de gas.

Tamaño de la válvula d = 15 mm.

Diámetro del orificio D_o = 5 mm.

Diámetro interno de la tubería D = 15 mm.

Argon gas a 47 °C, peso molecular = 39,95 kg/kmol.

Presión absoluta de entrada P_1 = 2,8 bar; Presión absoluta de salida = 1,3 bar.

Caudal Q = 0,4 Nm^3/h a 1,01325 bar y 47 °C.

Viscosidad cinemática ν = 1,338 x 10^{-5} m^2/s a 1 bar (presión absoluta) y 15 °C.

Relación de calores específicos γ = 1,67.

Factor de relación de calores específicos F_γ = 1,19.

Factor de relación de presión diferencial x_T = 0,80 (tabla 8.18).

Factor de recuperación de presión del líquido F_L = 0,98 (tabla 8.18).

Aumentamos el caudal en un 15%, Q = 0,46 Nm^3/h a 1,01325 bar y 47 °C.

El primer paso es comprobar el valor del número de Reynolds.

$$Re_v = \frac{N_4 \times F_d \times Q}{v \times \sqrt{C \times F_L}} \times \sqrt[4]{\frac{F_L^2 \times C^2}{N_2 \times D^4} + 1}$$

Para lo que hay que calcular el valor de C (K_v).

$$x = \frac{\Delta p}{P_1} = \frac{2,8 - 1,3}{2,8} = 0,536$$

El factor de expansión Y es:

$$Y = 1 - \frac{x}{3 \times F_\gamma \times x_T} = 1 - \frac{0,536}{3 \times 1,19 \times 0,80} = 0,812$$

$$K_v = \frac{Q}{N_9 \times P_1 \times Y}\sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{x}} = \frac{0,46}{2.600 \times 2,8 \times 0,812}\sqrt{\frac{39,95 \times 320 \times 1}{0,536}} = 0,012$$

$$K_{v1} = 1,3 \times K_v = 1,3 \times 0,012 = 0,016$$

Valor estimado de F_d (tabla 8.18):

$$F_d = N_{19} \times \frac{\sqrt{K_{v1} \times F_L}}{D_0} = 2,5 \times \frac{\sqrt{0,016 \times 0,95}}{5} = 0,062$$

El número de Reynolds es:

$$Re_v = \frac{N_4 \times F_d \times Q}{v \times \sqrt{K_{v1} \times F_L}} \times \sqrt[4]{\frac{F_L^2 \times K_{v1}^2}{N_2 \times D^4} + 1} = \frac{0,0707 \times 0,062 \times 0,46}{1,338 \times 10^{-5} \times \sqrt{0,016 \times 0,98}} \times \sqrt[4]{\frac{0,98^2 \times 0,016^2}{0,0016 \times 15^4} + 1} = 1.203$$

Comprobar si:

$$\frac{K_v}{d^2} < 0,016 \times N_{18}$$

$$\frac{0,016}{15^2} = 0,0000711 < 0,016 \times 0,865 = 0,0138$$

Como el número de Reynolds es menor de 10.000, el fluido es no turbulento (laminar y de transición) y se utiliza la ecuación:

$$n_2 = 1 + N_{32} \times \left(\frac{K_{v1}}{d^2}\right)^{2/3} = 1 + 140 \times \sqrt[3]{\left(\frac{0,016}{15}\right)^2} = 1,29$$

Se aplica un factor de corrección del número de Reynolds F_R que, en válvulas de partes internas reducidas, es:

$$F_R = 1 + \left(\frac{0,33 \times F_L^{1/2}}{n_2^{1/4}}\right) \times log_{10}\left(\frac{Re_v}{10.000}\right) = 1 + \left(\frac{0,33 \times 0,98^{1/2}}{1,29^{1/4}}\right) \times log_{10}\left(\frac{1.203}{10.000}\right) = 0,713$$

O bien la ecuación:

$$F_R = \frac{0,026}{F_L} \times \sqrt{n_2 \times Re_v} = \frac{0,026}{0,98} \times \sqrt{1,29 \times 1.203} = 1,045$$

De los dos valores de F_R se utiliza el menor, 0,713. Así, el cálculo de K_v nos da:

$$K_v = \frac{Q}{N_{22} \times F_R} \sqrt{\frac{M \times T_1}{\Delta P \times (P_1 + P_2)}} = \frac{0,46}{1.840 \times 0,713} \sqrt{\frac{39,95 \times 320}{1,5 \times 4,1}} = 0,016$$

Comprobación del cálculo:

$$\frac{K_v}{F_R} = \frac{0,016}{0,713} = 0,0224 > K_{v1} = 0,016$$

Se repite el proceso de iteración aumentando K_{v1} en un 30%. Y así, K_{v2} = 1,3 × 0,016 = 0,0208.

$$F_d = N_{19} \times \frac{\sqrt{K_{v2} \times F_L}}{D_0} = 2,5 \times \frac{\sqrt{0,0208 \times 0,98}}{5} = 0,0714$$

Y el número de Reynolds es:

$$Re_v = \frac{N_4 \times F_d \times Q}{\nu \times \sqrt{K_{v2} \times F_L}} \times \sqrt[4]{\frac{F_L^2 \times K_{v2}^2}{N_2 \times D^4} + 1} = \frac{0,0707 \times 0,062 \times 0,46}{1,338 \times 10^{-5} \times \sqrt{0,0208 \times 0,98}} \times \sqrt[4]{\frac{0,98^2 \times 0,0208^2}{0,0016 \times 15^4} + 1} = 1.056$$

Como el número de Reynolds varía poco, habiendo pasado de 1.203 a 1.056, el valor de F_R es prácticamente igual a F_R = 0,713 y el valor de K_v = 0,016. De este modo, las partes internas (obturador y asiento) tendrán K_v de valor 0,0126 o superior.

2. Flujo no turbulento con conos reductores

Condición número de Reynolds < 10.000.

Constante N	Coeficiente de caudal C		Unidades de la fórmula						
	K_v	C_v	W (caudal en peso)	Q (caudal en volumen)	P, Δp (presión, pérdida de carga)	ρ (peso específico)	T (Temperatura absoluta)	d, D	ν
N_1	0,1	0,0865	–	m³/h	kPa	kg/m³	–	–	–
	1	0,865	–	m³/h	bar	kg/m³	–	–	–
		1	–	gpm	psia	lbm/ft³	–	–	–
N_2	$1,60 \times 10^{-3}$	$2,14 \times 10^{-3}$						mm	
		$8,9 \times 10^{2}$						pulgadas	
N_4	$7,07 \times 10^{-2}$	$7,6 \times 10^{2}$		m³/h					m²/s
		$8,73 \times 10^{4}$		gpm					cS
		$2,153 \times 10^{4}$		scfh					cS

Tabla 8.21 Constantes numéricas de aplicación a las fórmulas del coeficiente de válvula (K_v o C_v). Fuente: ANSI/ISA–75.01.01–2002 (IEC 60534-2-1 Mod)

Constante N	Coeficiente de caudal C		Unidades de la fórmula						
	K_v	C_v	W (caudal en peso)	Q (caudal en volumen	P, Δp (presión, pérdida de carga	ρ (peso específico)	T (Temperatura absoluta)	d, D	v
N_5	$1{,}80 \times 10^{-3}$	$2{,}41 \times 10^{-3}$	–	–	–	–	–	mm	–
		1×10^{3}	–	–	–	–	–	pulgadas	–
N_6	3,16	2,73	Kg/h	–	kPa	kg/m^3	–	–	–
	$3{,}16 \times 10$	$2{,}73 \times 10$	Kg/h	–	bar	kg/m^3	–	–	–
		$6{,}33 \times 10$	lbm/h	–	psia	lbm/ft^3	–	–	–
N_7	4,82	4,17	–	m^3/h	kPa	–	–	–	–
	$4{,}82 \times 10^{2}$	$4{,}17 \times 10^{2}$	–	gpm	bar	–	–	–	–
		$1{,}36 \times 10^{3}$	–	scfh	psia	–	–	–	–
N_8	1,1	$9{,}48 \times 10^{-1}$	Kg/h	–	kPa	–	K	–	–
	$1{,}10 \times 10^{2}$	$9{,}48 \times 10$	Kg/h	–	bar	–	K	–	–
		$1{,}93 \times 10$	lbm/h	–	psia	–	R	–	–
N_9 (t = 0 ºC)	$2{,}46 \times 10$	$2{,}12 \times 10$	–	m^3/h	kPa	–	K	–	–
	$2{,}46 \times 10^{3}$	$2{,}12 \times 10^{3}$	–	m^3/h	bar	–	K	–	–
		$6{,}94 \times 10^{3}$	–	scfh	psia	–	R	–	–
N_9 (t = 15 ºC)	$2{,}60 \times 10$	$2{,}25 \times 10$	–	m^3/h	kPa	–	K	–	–
	$2{,}60 \times 10^{3}$	$2{,}25 \times 10^{3}$	–	m^3/h	bar	–	K	–	–
		$7{,}32 \times 10^{3}$	–	scfh	psia	–	R	–	–
N_{18}	$8{,}65 \times 10^{-1}$	1	–	–	–	–	–	mm	–
		$6{,}45 \times 10^{2}$	–	–	–	–	–	pulgadas	–
N_{19}	2,5	2,3	–	–	–	–	–	mm	–
		$9{,}06 \times 10^{-2}$	–	–	–	–	–	pulgadas	–
N22 (t = 0 ºC)	$1{,}73 \times 10$	$1{,}50 \times 10$	–	m^3/h	kPa	–	K	–	–
	$1{,}73 \times 10^{3}$	$1{,}50 \times 10^{3}$	–	m^3/h	bar	–	K	–	–
		$4{,}92 \times 10^{3}$	–	scfh	psia	–	R	–	–
N_{22} (t = 15 ºC)	$1{,}84 \times 10$	$1{,}59 \times 10$	–	m^3/h	kPa	–	K	–	–
	$1{,}84 \times 10^{3}$	$1{,}59 \times 10^{3}$	–	m^3/h	bar	–	K	–	–
		$5{,}20 \times 10^{3}$	–	scfh	psia	–	R	–	–
N_{27} (t = 0 ºC)	$7{,}75 \times 10^{-1}$	$6{,}70 \times 10^{-1}$	Kg/h		kPa	–	K	–	–
	$7{,}75 \times 10$	$6{,}70 \times 10$	Kg/h		bar	–	K	–	–
		$1{,}37 \times 10$	lbm/h		psia	–	R	–	–
N_{32}	$1{,}40 \times 10^{2}$	$1{,}27 \times 10^{2}$	–	–	–	–	–	mm	–
		1,7	–	–	–	–	–	pulgadas	–

Tabla 8.21 continuación *Constantes numéricas de aplicación a las fórmulas del coeficiente de válvula (K_v o C_v). Fuente: ANSI/ISA–75.01.01–2002 (IEC 60534-2-1 Mod)*

Los conos reductores alteran el flujo laminar en la tubería, pero al no existir suficiente información sobre su influencia, se prefiere utilizar la fórmula del flujo no turbulento para válvulas del mismo tamaño que la tubería, para el cálculo de F_R, aunque se obtengan valores inferiores de los reales. El usuario tenderá a aumentar su valor.

El cálculo es iterativo, empezando por el coeficiente de caudal C para flujo turbulento y utilizando el modificador de tipo de válvula F_d, que convierte la forma geométrica del orificio de la válvula a un tubo de sección circular.

8.1.11.10 Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas

Puede verse en la tabla 8.22 para líquidos, gases y vapores. Hay que señalar que los fabricantes de válvulas disponen de programas informáticos que determinan los coeficientes K_v o C_v de las fórmulas con la suficiente aproximación para la selección del tamaño de la válvula del fabricante.

Fórmulas de coeficientes de válvulas ($C_v = 1{,}16 \times K_v$; $K_v = 0{,}86 \times C_v$)				
Líquidos (flujo turbulento)	Condiciones subcríticas (sin conos reductores)	$\Delta p\ critica < F_L^2 \times (P_1 - F_F \times P_v)$ P1 = Presión absoluta de entrada ; FL = Factor de recuperación de presión en líquidos; FF = factor de recuperación de presión del líquido sin conos reductores;	$K_v = Q\sqrt{\dfrac{\rho}{\Delta p}}$	Q = caudal máximo, en m³/h; ρ = densidad relativa con respecto al agua; Δp = pérdida de carga en bar; Pv = Presión de vapor (bar)
			$C_v = Q\sqrt{\dfrac{\rho}{\Delta p}}$	Q = caudal máximo, en gpm; ρ = densidad relativa con respecto al agua; Δp = pérdida de carga en psia; Pv = Presión de vapor (psia)
	Condiciones subcríticas (con conos reductores)	$\Delta p\ critica < \left(\dfrac{F_{LP}}{F_P}\right)^2 \times (P_1 - F_F \times P_v)$ FLP = Factor de recuperación de presión del líquido combinado con el Factor de geometría de la tubería de la válvula de control con conos reductores; FP = Factor de geometría de la tubería de la válvula de control; FF = factor de recuperación de presión	$K_v = \dfrac{Q}{F_P}\sqrt{\dfrac{\rho}{\Delta p}}$	Q = caudal máximo, en m³/h; ρ = densidad relativa con respecto al agua; P1 = Presión absoluta de entrada (bar); Δp = pérdida de carga en bar
			$C_v = \dfrac{Q}{F_P}\sqrt{\dfrac{\rho}{\Delta p}}$	Q = caudal máximo, en gpm; ρ = densidad relativa con respecto al agua; P1 = Presión absoluta de entrada (psia); Δp = pérdida de carga en psia
	Condiciones críticas (sin conos reductores)	$\Delta p\ critica \geq \left(\dfrac{F_{LP}}{F_P}\right)^2 \times (P_1 - F_F \times P_v)$ FLP = Factor de recuperación de presión del líquido combinado con el Factor de geometría de la tubería de la válvula de control con conos reductores; FP = Factor de geometría de la tubería de la válvula de control; FL = Factor de recuperación de presión	$K_v = \dfrac{Q}{F_L} \times \sqrt{\dfrac{\rho}{P_1 - F_F P_v}}$	Q = caudal máximo (m³/h); P1 = Presión absoluta de entrada (bar); ρ = densidad relativa con respecto al agua; Pv = Presión de vapor (bar)
			$C_v = \dfrac{Q}{F_L} \times \sqrt{\dfrac{\rho}{P_1 - F_F P_v}}$	Q = caudal máximo (gpm); P1 = Presión absoluta de entrada (psia); ρ = densidad relativa con respecto al agua; Pv = Presión de vapor (psia)
	Condiciones críticas (con conos reductores)	$\Delta p\ critica \geq \left(\dfrac{F_{LP}}{F_P}\right)^2 \times (P_1 - F_F \times P_v)$ FLP = Factor de recuperación de presión del líquido combinado con el Factor de geometría de la tubería de la válvula de control con conos reductores; FP = Factor de geometría de la tubería de la válvula de control	$K_v = \dfrac{Q}{F_{LP}} \times \sqrt{\dfrac{\rho}{P_1 - F_F P_v}}$	Q = caudal máximo (m³/h); P1 = Presión absoluta de entrada (bar); ρ = densidad relativa con respecto al agua; Pv = Presión de vapor (bar)
			$C_v = \dfrac{Q}{F_{LP}} \times \sqrt{\dfrac{\rho}{P_1 - F_F P_v}}$	Q = caudal máximo (gpm); P1 = Presión absoluta de entrada (psia); ρ = densidad relativa con respecto al agua; Pv = Presión de vapor (psia)
Líquidos (flujo no turbulento -laminar o de transición)) - Nº de Reynolds < 10.000	Flujo no turbulento (sin conos reductores)	$Re_v = \dfrac{0{,}0707 \times F_d \times Q}{v \times \sqrt{K_v \times F_L}} \times \sqrt[4]{\dfrac{F_L^2 \times K_v^2}{0{,}0016 \times D^4} + 1} < 10.000$ FR = Factor de corrección del número de Reynolds; Fd =Factor de modificación del tipo de válvula; V = Viscosidad cinemática (centistokes); FL = Factor de recuperación de presión en líquidos	$K_v = \dfrac{Q}{F_R} \times \sqrt{\dfrac{\rho}{P_1 - P_2}}$	Q = caudal máximo (m³/h); P1 = Presión absoluta de entrada (bar); P2 = Presión absoluta de salida (bar); ρ = densidad relativa con respecto al agua; Pv = Presión de vapor (bar); D =n tamaño de la válvula (mm)
		$Re_v = \dfrac{87.300 \times F_d \times Q}{v \times \sqrt{C_v \times F_L}} \times \sqrt[4]{\dfrac{F_L^2 \times C_v^2}{890 \times D^4} + 1} < 10.000$ FR = Factor de corrección del número de Reynolds; Fd =Factor de modificación del tipo de válvula; V = Viscosidad cinemática (centistokes); FL = Factor de recuperación de presión en líquidos	$C_v = \dfrac{Q}{F_R} \times \sqrt{\dfrac{\rho}{P_1 - P_2}}$	Q = caudal máximo (gpm); P1 = Presión absoluta de entrada (psia); P2 = Presión absoluta de salida (psia); ρ = densidad relativa con respecto al agua; Pv = Presión de vapor (psia); D = Tamaño de la válvula (pulgadas)
	Flujo no turbulento (con conos reductores)	Utilizar las fórmulas de flujo no turbulento sin conos reductores, aunque se obtengan valore inferiores a los reales		

Tabla 8.22 Fórmulas de coeficientes de válvulas (K_v y C_v).
Fuente: ANSI/ISA-75.01.01-2002 (IEC 60534-2-1 Mod)

Fórmulas de coeficientes de válvulas ($C_v = 1,16 \times K_v$; $K_v = 0,86 \times C_v$)				
Gases y vapores (flujo turbulento)	Condiciones subcríticas (sin conos reductores)	$x < F_Y \times x_T$	$K_v = \frac{Q}{2.460 \times P_1 \times Y}\sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{x}}$	Q = caudal máximo (m3/h); P1 = Presión absoluta de entrada (bar); T1 = temperatura en grados Kelvin (ºC + 273).
		x = Factor de relación entre la presión diferencial y la presión absoluta de entrada (Δp/P1); XT = Factor de relación de presión diferencial de una válvula de control instalada sin reductores ; Fy = Factor de relación de calores específicos; M = Peso mole	$C_v = \frac{Q}{6.940 \times P_1 \times Y}\sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{x}}$	Q = caudal máximo (gpm); P1 = Presión absoluta de entrada (psia); T1 = temperatura en grados Rankine (K * (9/5)).
	Condiciones subcríticas (con conos reductores)	$x < F_Y \times x_T$	$K_v = \frac{Q}{2.460 \times F_p \times P_1 \times Y}\sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{x}}$	Q = caudal máximo (m3/h); P1 = Presión absoluta de entrada (bar); T1 = temperatura en grados Kelvin (ºC + 273).
		x = Factor de relación entre la presión diferencial y la presión absoluta de entrada (Δp/P1); XT = Factor de relación de presión diferencial de una válvula de control instalada sin reductores ; Fy = Factor de relación de calores específicos; FP = Factor d	$C_v = \frac{Q}{6.940 \times F_p \times P_1 \times Y}\sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{x}}$	Q = caudal máximo (gpm); P1 = Presión absoluta de entrada (psia); T1 = temperatura en grados Rankine (K * (9/5)).
	Condiciones críticas (sin conos reductores)	$x \geq F_Y \times x_T$	$K_v = \frac{Q}{1.640 \times P_1}\sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{F_Y \times x_T}}$	Q = caudal máximo (m3/h); P1 = Presión absoluta de entrada (bar); T1 = temperatura en grados Kelvin (ºC + 273).
		x = Factor de relación entre la presión diferencial y la presión absoluta de entrada (Δp/P1); XT = Factor de relación de presión diferencial de una válvula de control instalada sin reductores ; Fy = Factor de relación de calores específicos; FP = Factor d	$C_v = \frac{Q}{4.630 \times P_1}\sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{F_Y \times x_T}}$	Q = caudal máximo (gpm); P1 = Presión absoluta de entrada (psia); T1 = temperatura en grados Rankine (K * (9/5)).
	Condiciones críticas (con conos reductores)	$x \geq F_Y \times x_T$	$K_v = \frac{Q}{1.640 \times F_p \times P_1}\sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{F_Y \times x_{TP}}}$	Q = caudal máximo (m3/h); P1 = Presión absoluta de entrada (bar); T1 = temperatura en grados Kelvin (ºC + 273).
		x = Factor de relación entre la presión diferencial y la presión absoluta de entrada (Δp/P1); XT = Factor de relación de presión diferencial de una válvula de control instalada sin reductores ; Fy = Factor de relación de calores específicos; FP = Factor d	$C_v = \frac{Q}{4.630 \times F_p \times P_1}\sqrt{\frac{M \times T_1 \times Z}{F_Y \times x_{TP}}}$	Q = caudal máximo (gpm); P1 = Presión absoluta de entrada (psia); T1 = temperatura en grados Rankine (K * (9/5)).
Gases y vapores (flujo no turbulento - laminar o de transición)	Sin conos reductores	$Re_v = \frac{0,0707 \times F_d \times Q}{v \times \sqrt{K_v \times F_L}} \times \sqrt[4]{\frac{F_L^2 \times K_v^2}{0,016 \times D^4} + 1}$ Condición número de Reynolds < 10.000. D = Tamaño de la válvula Fd =Factor de modificación del tipo de válvula; FR = Factor de corrección del número de Reynolds; V = Viscosidad cinemática (centistokes); FL = Factor de recuperación de presión	$K_v = \frac{Q}{1.840 \times F_R}\sqrt{\frac{M \times T_1}{\Delta p \times (P_1 + P_2)}}$	Q = caudal máximo (m3/h); P1 = Presión absoluta de entrada (bar); P2 = Presión absoluta de salida (bar); M = Peso molecular; T1 = temperatura en grados Kelvin (ºC + 273); Δp = Pérdida de carga (bar);
		$Re_v = \frac{21.530 \times F_d \times Q}{v \times \sqrt{C_v \times F_L}} \times \sqrt[4]{\frac{F_L^2 \times C_v^2}{890 \times D^4} + 1}$ Condición número de Reynolds < 10.000. D = Tamaño de la válvula Fd =Factor de modificación del tipo de válvula; FR = Factor de corrección del número de Reynolds; V = Viscosidad cinemática (centistokes); FL = Factor de recuperación de presión	$C_v = \frac{Q}{5.200 \times F_R}\sqrt{\frac{M \times T_1}{\Delta p \times (P_1 + P_2)}}$	Q = caudal máximo (scfh); P1 = Presión absoluta de entrada (psia); P2 = Presión absoluta de salida (psia); M = Peso molecular; T1 = temperatura en grados Rankine (ºK * (9/5)); Δp = Pérdida de carga (psia);
	Flujo no turbulento (con conos reductores)	Utilizar las fórmulas de flujo no turbulento sin conos reductores, aunque se obtengan valore inferiores a los reales		

Tabla 8.22 continuación *Fórmulas de coeficientes de válvulas (continuación). Fuente: ANSI/ISA-75.01.01-2002 (IEC 60534-2-1 Mod)*

8.1.12 Ruido en las válvulas de control

8.1.12.1 Generalidades

En las industrias de proceso intervienen muchos factores que contribuyen al mantenimiento de altos niveles de ruido, entre los cuales, uno de los más importantes es el generado durante el funciona-

miento de las válvulas de control instaladas en tuberías que transportan líquidos, gases y vapores. Las leyes y normas aparecidas en la industria sobre el nivel de ruido admisible han contribuido a desarrollar, con ímpetu creciente, el estudio de su reducción en las válvulas de control. Como es natural, es básico analizar a fondo las causas del ruido en las válvulas para reducirlos a niveles aceptables.

De este modo, es posible evitar problemas acústicos en el proyecto de nuevas instalaciones. La reducción del ruido tiene dos efectos beneficiosos, cumplir la ley de prevención de riesgos laborales y eliminar el problema de altos niveles de ruido existentes dentro de las tuberías y componentes mecánicos situados aguas abajo de la válvula de control, que pueden llegar a destruirlos por vibración excesiva.

En la tabla siguiente se representan los niveles de ruido y el tiempo máximo de exposición admisibles desde el punto de vista de salud.

Tiempo de exposición (horas)	Nivel de sonido (dBA)
8	90
4	95
2	100
1	105
½	110
¼ o menor	115

Tabla 8.23 Tiempo de exposición al nivel de ruido

El cálculo del nivel de ruido de las válvulas de control es un problema que actualmente no puede resolverse de forma precisa debido al desconocimiento del valor de los distintos parámetros que intervienen. La predicción del nivel de ruido se hace, empíricamente, tomando como bases los múltiples datos tomados en ensayos realizados en condiciones de laboratorio.

Los términos más comúnmente empleados son:

Sonido. Forma de vibración que se propaga a través de medio elástico tal como el aire, por medio de una alternativa compresión y liberación de las moléculas a una frecuencia característica del medio.

Frecuencia del sonido, en Hz. Número de ondas sónicas que pasan por una posición en un segundo, o bien, número de veces con que la presión sónica varía en un ciclo completo (compresión y liberación) por segundo.

Presión del sonido. La onda sónica tiene una presión que fluctúa, por encima y por debajo de la presión atmosférica, y que produce la sensación auditiva del sonido. La presión del sonido es el valor cuadrático medio (valor eficaz) de los valores que la presión va tomando al ir variando de un valor alto en la compresión a un valor bajo en la expansión.

Decibelio, dB. Número sin dimensiones que es la décima parte del Bel. El Bel es el logaritmo en base 10 de la relación de dos potencias o intensidades. En acústica, el decibelio relaciona el nivel de presión del sonido o un nivel de potencia sónica con un nivel de referencia seleccionado.

Nivel de presión del sonido, spl (sound pressure level). Expresado en decibelios, el nivel de presión del sonido es 20 veces el logaritmo en base 10 de la relación entre la presión de este sonido y una presión de referencia que se toma, generalmente, de 0,0002 microbars.

$$Lp(dB) = 10 log_{10}\left(\frac{P}{P_0}\right)^2 = 20 log_{10}\frac{P}{P_0}$$

donde:

P = presión medida en Pascal

P_0 = presión de referencia = 2 × 10^{-5} Pascal (N/m^2)

dB A. Nivel de presión medido en decibelios en la escala "A" de frecuencia de un medidor de nivel de sonido. El circuito "A" simula, con mucha aproximación, la sensibilidad del oído humano. Este es más sensible entre 500 y 1000 Hz con una cresta entre 3000 y 4000 Hz. Normalmente el nivel del sonido está referido a 1 metro de distancia aguas abajo de la válvula y a 1 metro de distancia de la tubería.

Atenuación. Debilitamiento o reducción del nivel de presión de sonido.

Otros términos empleados:

K_v o C_v = coeficiente nominal de capacidad de la válvula

P_1= presión anterior a la válvula, bar

P_2 = presión posterior a la válvula, bar

P_v = presión del vapor del fluido, bar

F_p = razón de recuperación de presiones en la válvula, sin dimensiones

Z_1 = punto de cavitación incipiente

Z_2 = punto de máximo nivel de presión sónica en el flujo de un líquido

ΔP = diferencia de presiones P_1 - P_2, bar

ΔPIP_1 = razón de presiones (diferencia de presiones dividida por la presión anterior)

Los valores corrientes del nivel de presión del sonido se encuentran en la tabla 8.24 que figura a continuación.

dB	*Fuente de sonido*	*dB*	*Fuente de sonido*
155	Sirena próxima	70	Oficina ruidosa
140	Jet (umbral de dolor)	60	Conversación
130	Prensa hidráulica	50	Oficina
120	Claxon fuerte	40	Biblioteca
110	Camiones	30	Estudio de grabación
100	Metro; avión a hélice	20	Reloj eléctrico (3 m)
90	Orquesta sinfónica	10	Crujido de la hierba
80	Tráfico pesado	0	Umbral de silencio

Tabla 8.24 Nivel de presión sónica de ruidos comunes

8.1.12.2 Causas del ruido en las válvulas

La alta velocidad de los fluidos en las tuberías es una causa importante del ruido en las válvulas. Sin embargo, no pueden darse reglas de velocidad por la gran cantidad de variables que influyen.

Como guía, pueden considerarse los siguientes valores:

Líquidos:	1,5-3 m/s a 12-15 m/s
Gases:	75-120 m/s hasta 0,3 Mach
Vapor de agua o vapores:	20-30 m/s (hasta 2 bar)
	30-50 m/s (saturado hasta 2 bar)
	35-100 m/s (vapor sobrecalentado hasta 15 bar o 0,15 Mach)

La pérdida de presión, a través de la válvula, convierte la energía potencial del fluido en energía cinética por el aumento de velocidad que se presenta en el interior de la válvula en las partes internas (orificio entre el obturador y el asiento). Parte de la turbulencia generada por el aumento de velocidad del fluido (típicamente ¼ de la potencia acústica producida en el orificio interno) hace vibrar la tubería aguas abajo de la válvula, lo que se traduce en ondas de ruido radiadas a través de la tubería.

Tres son las causas principales del ruido en las válvulas de control: *vibración mecánica*, *ruido hidrodinámico* y *ruido aerodinámico*.

La *vibración mecánica* es debida a las fluctuaciones de presión casuales que se producen dentro del cuerpo de la válvula y al choque del fluido contra las partes móviles de la misma. Estos fenómenos dan lugar a la vibración del elemento correspondiente.

La vibración mecánica que se presenta con más frecuencia en la válvula es el movimiento lateral del obturador con relación a las superficies de guía. El ruido de esta vibración se parece a un golpeteo metálico y su frecuencia es normalmente menor de 1500 Hz.

Otra causa es la entrada en resonancia de un componente de válvula vibrando a su frecuencia natural. El ruido se reconoce por su característica altura de tono de alta frecuencia comprendido normalmente entre 3000 y 7000 Hz. Se produce una alta fatiga mecánica del material que puede llegar a destruirlo.

La mejora gradual en la calidad de fabricación de las válvulas de control ha disminuido la importancia de la vibración mecánica frente a los fenómenos de cavitación y de turbulencia. Por otro lado, puede eliminarse la vibración mecánica variando las condiciones del proceso o bien, si ello no es posible, cambiando la masa del obturador.

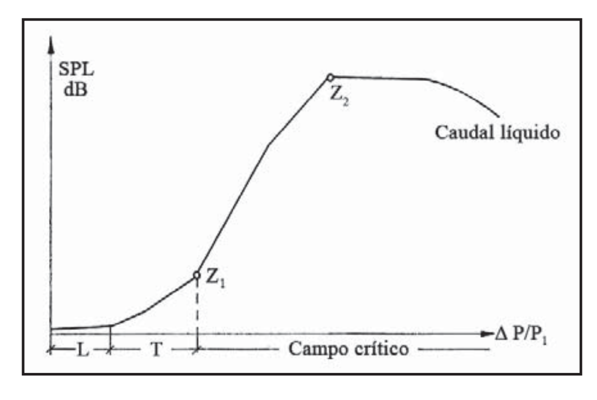


Figura 8.58 Nivel de ruido en líquidos

El *ruido hidrodinámico* es producido al circular los líquidos a través de la válvula, pudiendo encontrarse en varios estados: sin cavitación, con cavitación, y con vaporización, estados que se representan en la curva que relaciona el cociente de presiones $\Delta P/P_1$ y el nivel del ruido generado (SPL) (figura 8.58). Se encuentra primero una banda estrecha (L) sin casi emisión de sonido, sigue a continuación una banda más ancha (T) en la que aumenta moderadamente el nivel de ruido y, a partir de un cierto punto Z_1, el ruido aumenta bruscamente para alcanzar un valor máximo Z_2.

La *cavitación* iniciada en el punto Z_1 tiene lugar en dos etapas. En la primera, el fluido alcanza su máxima velocidad al pasar a través del orificio interno existente entre el obturador y el asiento y, si esta velocidad es suficiente, la presión en la vena contraída puede reducirse a la presión de vaporización del líquido, pasando éste al estado de vapor en forma de burbujas. La segunda etapa tiene lugar aguas abajo donde el fluido disminuye su velocidad y aumenta paralelamente su presión por encima de la presión de vapor y las burbujas, formadas anteriormente, se aplastan. La cavitación puede provocar graves daños y problemas importantes de vibración en las válvulas de control. Sin embargo, es fácil evitarla seleccionando adecuadamente los límites en las condiciones de servicio (ver estudio de cavitación). En el punto Z_2 existe el máximo nivel de presión del sonido. A continuación, sigue una potencia acústica radiada casi constante que se reduce al aumentar todavía más la relación $\Delta P/P_1$. Este último fenómeno se presenta porque la presión de salida P_2 se aproxima a la presión de vapor del líquido, es decir, la diferencia $P_2 - P$, tiende a cero y, en estas condiciones, prevalece más bien una evaporación continua en una fase de vapor comparativamente estable que una evaporación rápida con la subsiguiente condensación brusca. Por tanto, ello se traduce en una disminución del grado de cavitación y, por consiguiente, en un menor nivel de presión del sonido.

El *ruido aerodinámico* es la causa principal del ruido producido por la válvula. Proviene del flujo turbulento del vapor, del aire y de otros gases, siendo despreciable, prácticamente, en los líquidos. El ruido aerodinámico puede producirse por obstrucciones en el flujo del fluido, por expansión rápida o deceleración del gas a alta velocidad al salir de la válvula, o por codos o curvas bruscas existentes en el sistema de tuberías. Si el fluido alcanza la velocidad del sonido (Mach 1) se crean altos niveles de ruido; sin embargo, también pueden generarse ruidos importantes a velocidades tan bajas como 0,4 Mach y a bajas pérdidas de carga con grandes caudales. El ruido aerodinámico es aperiódico, con frecuencias comprendidas entre 2000 y 8000 Hz.

Los factores a considerar en la generación de este tipo de ruido son el tipo de fluido, el caudal, la presión anterior a la válvula, la pérdida de carga, la configuración de la tubería y las propiedades físicas del fluido. Entre los elementos que pueden producirlo directamente figuran los diafragmas, los autorreguladores de presión, etc.

La *Norma ISA-S75.17-1989 Control Valve Aerodynamic Noise Prediction* permite el cálculo del ruido aerodinámico. El ruido generado circula principalmente aguas abajo de la válvula dentro de la tubería y se transmite después a través de las paredes, siendo de interés el medido a 1 metro aguas abajo del cuerpo de la válvula y a una distancia de 1 metro fuera de la pared externa de la tubería. Las fórmulas correspondientes están basadas en ensayos realizados en condiciones de laboratorio y la exactitud conseguida en el cálculo, con respecto a la realidad de los ensayos de laboratorio, se estima en unos ± 5 dB.

En los cálculos se suponen gases y vapores secos de una sola fase que cumplan las leyes de los gases perfectos. Se suponen tuberías rectas en la descarga y velocidades máximas de salida de 0,3 Mach.

Se resumen los diferentes regímenes de generación de ruido y, a título sólo informativo, se presentan las fórmulas finales del ruido generado en la válvula y a 1 m de distancia al exterior de la tubería.

Los regímenes son el resultado de la conversión en energía sonora de una parte de la energía potencial (de presión) en turbulencia. Los diferentes tipos de regímenes resultan de diversos fenómenos sónicos entre las moléculas del gas y los chorros (*jets*) de choque sónico, y son:

- *Régimen I con flujo subsónico*, con el gas parcialmente recomprimido.

  P_2 (presión de salida) > P_{2C} (presión de salida en condiciones críticas)

- *Régimen II flujo sónico* con interacciones entre los chorros (*jets*) de choque sónico y la mezcla de caudal turbulento estrangulado. La recompresión del gas disminuye.

  P_{2C} (presión absoluta de salida en condiciones críticas) > P_2 (presión de salida) ≥

  ≥ P_{VCC} (presión absoluta en la vena contraída en condiciones críticas)

- *Régimen III flujo supersónico* sin recompresión isoentrópica. Domina el mecanismo de cizallamiento y turbulencia.

  P_{VCC} (presión absoluta en la vena contraída en condiciones críticas) >

  > P_2 (presión de salida) ≥ P_{2B} (presión absoluta de salida en el punto de ruptura)

- *Régimen IV en el que se forma un disco de Mach* con disminución de los chorros (*jets*) de choque sónico. El mecanismo dominante es la interacción entre los chorros (*jets*) de choque y el flujo turbulento.

  P_{2B} (presión absoluta de salida en el punto de ruptura) > P_2 (presión de salida) ≥
  ≥ P_{2CE} (presión absoluta de salida donde se inicia la zona de rendimiento acústico constante)

- *Régimen V con un rendimiento acústico constante*. Una disminución de la presión de salida P_2 no aumenta más el ruido.

  P_{2CE} (presión absoluta de salida donde se inicia la zona de rendimiento acústico constante) >
  > P_2 (presión de salida)

Después de realizar unos cálculos, comunes para todos los regímenes, se determina el ruido generado en el interior de la válvula que, como se ha dicho, se transmite con mayor facilidad aguas abajo de la tubería que a través del propio cuerpo de la válvula y es radiado al exterior.

A título de información, la fórmula final del ruido aerodinámico (nivel de presión interna del sonido) es:

$$L_{pi} = 10\, log_{10}\left(\frac{N_L W_a \rho_2 c_2}{D_i^2}\right)$$

con:

N_L = constante numérica

W_a = potencia generada por el sonido

ρ_2 = densidad aguas abajo

c_2 = velocidad del sonido aguas abajo

D_i = diámetro interno de la tubería

Finalmente, como nivel de presión sonora irradiado por la superficie exterior de la tubería y a 1 m de distancia, se obtiene:

$$NPSA_{e,1m} = NPSA_e - 10\,log_{10}\left[\frac{D_i + 2}{D_i}\right]$$

en la que:

D_i = diámetro interno de la tubería

NPS_i = nivel de presión sonora interno sobre la pared de la tubería

T_L = pérdida de transmisión corregida para la frecuencia máxima

NPS_g = corrección relativa al número de Mach

Los cálculos son muy complicados y, como se ha visto, dependen del régimen en el que se encuentre el flujo del fluido. Los fabricantes de válvulas de control facilitan programas de ordenador que permiten realizar rápidamente los cálculos de predicción del ruido. Para más información puede consultarse la Norma IEC 534-8-3 de 1995 o la ISA S75.17.1989 aprobada el 19 de junio de 1991 (*Control Valve Aerodynamic Noise Prediction*).

8.1.12.3 Reducción del ruido

La reducción del ruido en las válvulas de control se logra, bien atacando la fuente de ruido, o bien atenuando la transmisión del sonido.

En el primer caso, el caudal del fluido se diverge o bien se alarga su recorrido. Para la diversión del fluido en chorros se suele utilizar una válvula de bola o rotativa con el obturador perforado o un obturador del tipo jaula (figura 8.59), dotado de múltiples orificios de forma variada parecidos a panales de abeja. Con un cuerpo de tamaño adecuado, y con este tipo de obturador, es fácil disminuir el ruido en unos 20 dB en comparación con una válvula de globo convencional seleccionada sólo teniendo en cuenta su capacidad.

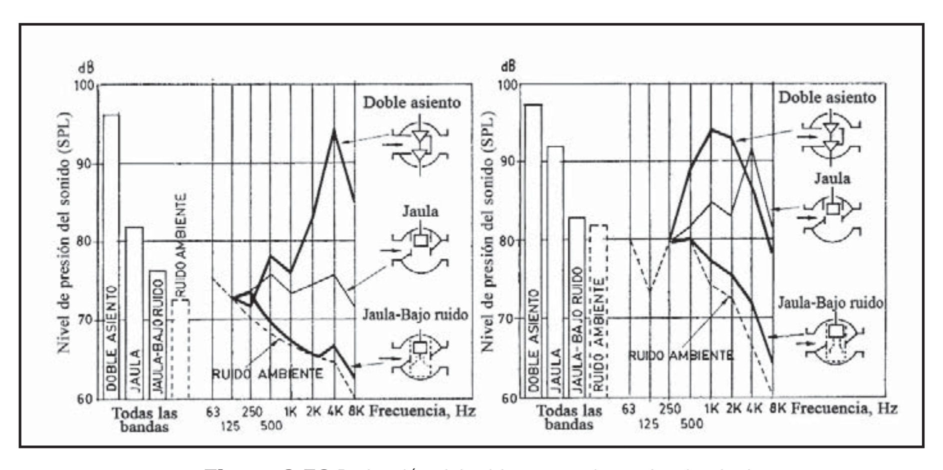


Figura 8.59 Reducción del ruido en un obturador tipo jaula

Para el alargamiento del recorrido (figura 8.60) se emplean conductos laberínticos, en las partes internas, entre el obturador y los asientos para aumentar la resistencia hidráulica del fluido y limitar su velocidad.

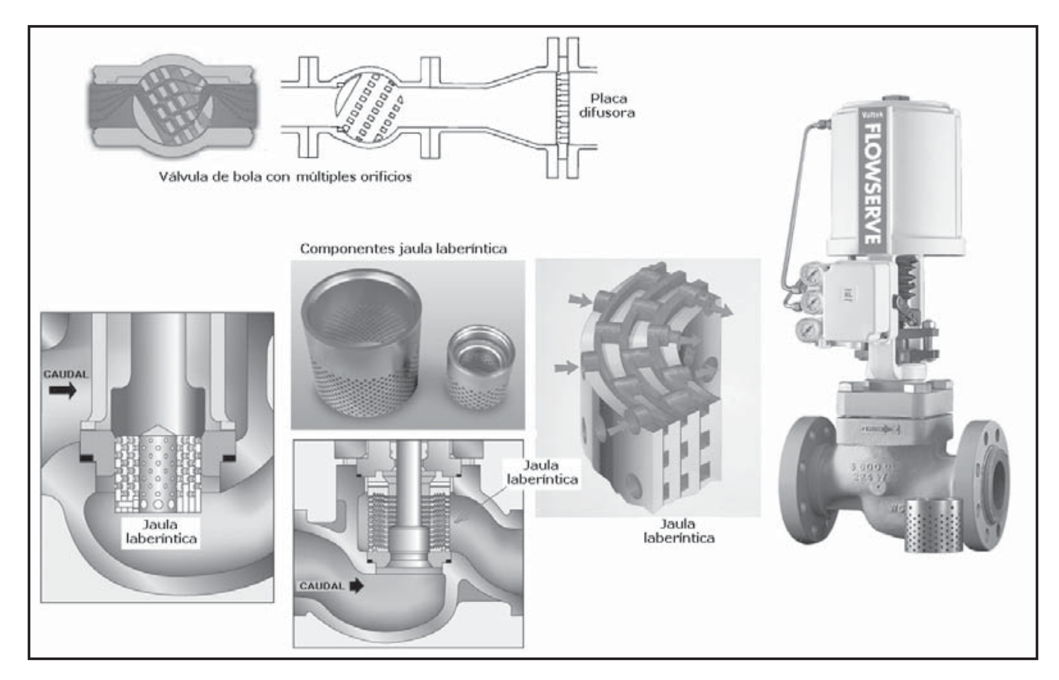


Figura 8.60 Conductos laberínticos entre obturador y asiento y difusores

Un conducto laberíntico complejo es el formado por un conjunto de discos con canales incorporados o cortados que forman pasos múltiples. De este modo, se reduce la velocidad y se aumentan las pérdidas por transmisión al incrementar la frecuencia. La reducción del ruido es del orden de los 30 dB.

La atenuación de la transmisión del sonido se logra por disipación de la energía acústica mediante materiales absorbentes. El material absorbente se sitúa aguas abajo y lo más próximo posible de la válvula de control. En la figura 8.61 puede verse un silenciador típico en forma de cámaras y tubos rellenos de material absorbente que puede atenuar el ruido en unos 30 dB o más.

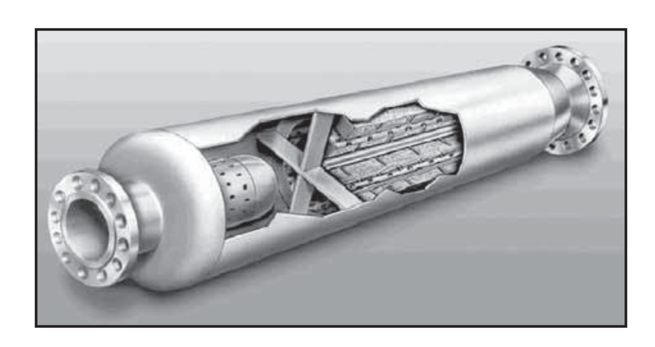


Figura 8.61 Silenciador en línea. Fuente: Valtek

Si el tipo de válvula seleccionada o el silenciador, o ambos, no atenúan suficientemente, es necesario aislar el ruido del exterior. Para ello, se disponen aislamientos sobre las fuentes en forma de manguitos, cajas aislantes o bien, incluso, cámaras y edificios especiales.

8.2 Otros elementos finales de control

En los procesos industriales altamente sofisticados, tales como hornos, tratamientos térmicos, máquinas de extrusión, máquinas de hilar fibra sintética, etc., la regulación precisa de la variable controlada (suele ser la temperatura) obliga a controlar la potencia entregada a las resistencias finales de calefacción.

Los primeros elementos que salieron al mercado, y que permitieron el control continuo de la potencia (sin considerar el control todo-nada), fueron el tiratrón y el ignitrón que eran, respectivamente, un tubo de vacío lleno de gas y un tubo con mercurio; sus dimensiones eran demasiado grandes y su costo excesivo para las potencias que se necesitaban. Después apareció el amplificador magnético o bobina saturable de bajo costo relativo, que ha sido realmente un equipo robusto que aportó la primera solución práctica de aplicación industrial. El rectificador controlado de silicio representó una revolución en el control de potencia por sus dimensiones reducidas y por trabajar con una alta densidad de corriente.

Estos elementos se comportan de forma parecida a una válvula de control: varían la corriente en la línea de alimentación a la carga en la misma forma en que una válvula cambia el caudal de fluido en una tubería.

8.2.1 Rectificadores controlados de silicio

Los *rectificadores controlados de silicio* o tiristores o SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) emplean rectificadores de silicio que bloquean el paso de la corriente en sentido inverso, igual que los convencionales, pero además la bloquean en sentido directo hasta que no se aplica una pequeña señal en el cable de control o puerta. Una vez el rectificador pasa al estado de conducción, la señal puede desconectarse y aquél continuará en el mismo estado hasta que la corriente no cambie de sentido. No hay nuevo paso de corriente si la excitación no "enciende" nuevamente el rectificador.

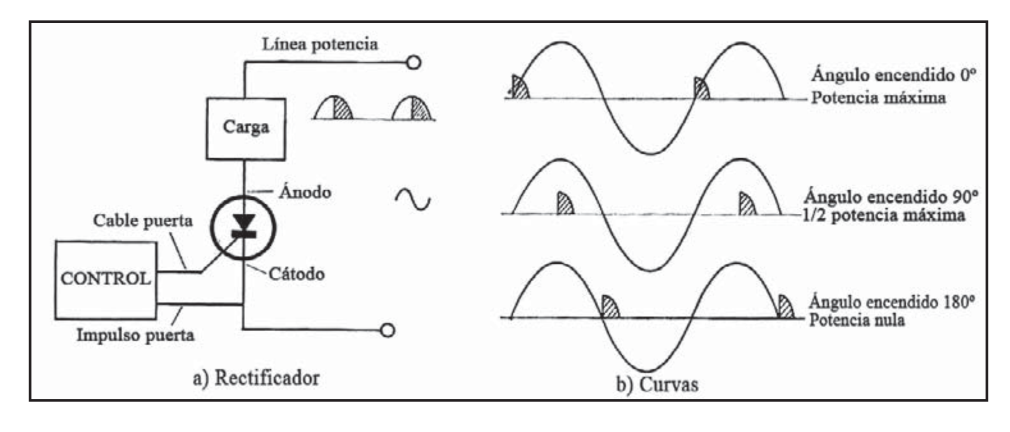


Figura 8.62 Rectificador controlado de silicio (SCR) y encendido por ángulo de fase

Para aprovechar el hemiciclo negativo se suele utilizar otro elemento SCR en oposición o bien su equivalente, una unidad triac.

El sistema de encendido de ángulo de fase (*phase angle fired*) (figura 8.62) puede aplicarse en el control de cargas resistivas e inductivas (figuras 8.63a y 8.63b).

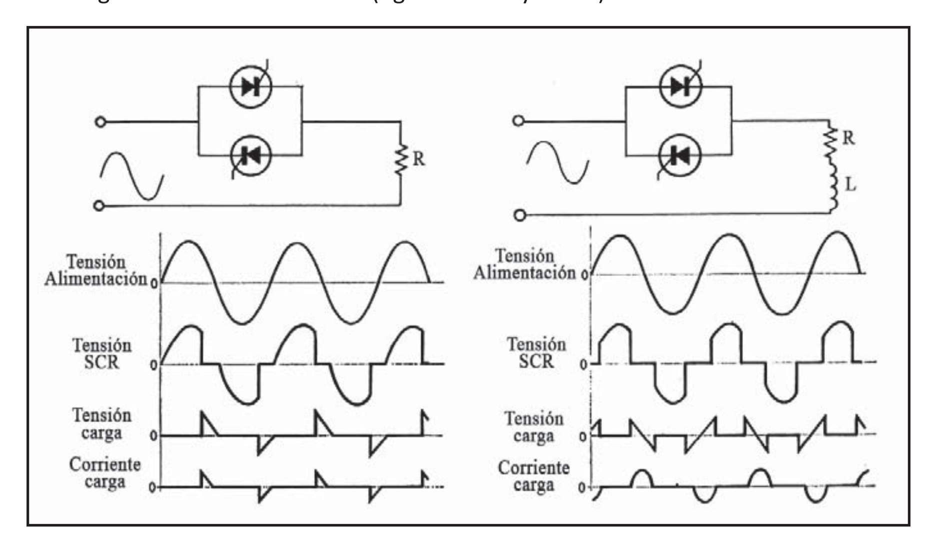


Figura 8.63 (a) Control de una carga resistiva (b) Control de una carga inductiva

En el *circuito de encendido por cruce de cero* (*zero crossover, fase cycling or burst firing*) la corriente alterna es entregada a la carga en forma de paquetes de ondas discontinuas. Este tren de ondas se genera mediante una excitación continua o bien por medio de impulsos sincronizados que actúan antes de que la tensión de línea cruce el valor cero, en lugar de un impulso sincronizado en fase como ocurría en el sistema de ángulo de fase. La señal de excitación mantiene el tiristor o el triac encendidos y al anularse aquélla, éstos dejan de conducir. El sistema se emplea típicamente en control proporcional en tiempo: se emiten una señal continua, o una serie de impulsos sincronizados, antes de que la tensión de línea cruce el valor cero, en número proporcional a la señal de control de 4-20 mA c.c. Si esta señal es, por ejemplo, de 12 mA c.c. y la base de tiempos o duración del ciclo es de 1 segundo, a la carga pasarán 25 ciclos "*on*" y dejarán de pasar 25 ciclos "*off*", tal como puede verse en la figura 8.64.

El circuito de encendido por cruce de cero se emplea, con preferencia, para cargas resistivas en calentamiento de hornos. En cargas ligeramente inductivas puede utilizarse con precaución, siempre que se limite el ángulo de encendido para evitar que la componente inductiva de la corriente dispare el circuito de protección.

Las unidades SCR requieren un sistema de protección para limitar la corriente de carga, en particular en el calentamiento de hornos donde el valor de las resistencias de calefacción varía del estado frío al estado caliente o de régimen. Esta limitación puede ser automática o manual, recomendándose la primera en hornos con elementos de calefacción de molibdeno o de platino. Si las características de la carga varían, y la corriente de carga llega a exceder el valor de seguridad, el limitador envía una señal al circuito de control del SCR a fin de mantener la corriente de salida a la carga en un valor soportable para los rectificadores de silicio. Esta disminución de corriente cambia

a medida que los elementos se van calentando gradualmente y van disminuyendo su resistencia eléctrica. El proceso continúa hasta el funcionamiento normal, en el cual el limitador de corriente no tiene prácticamente influencia.

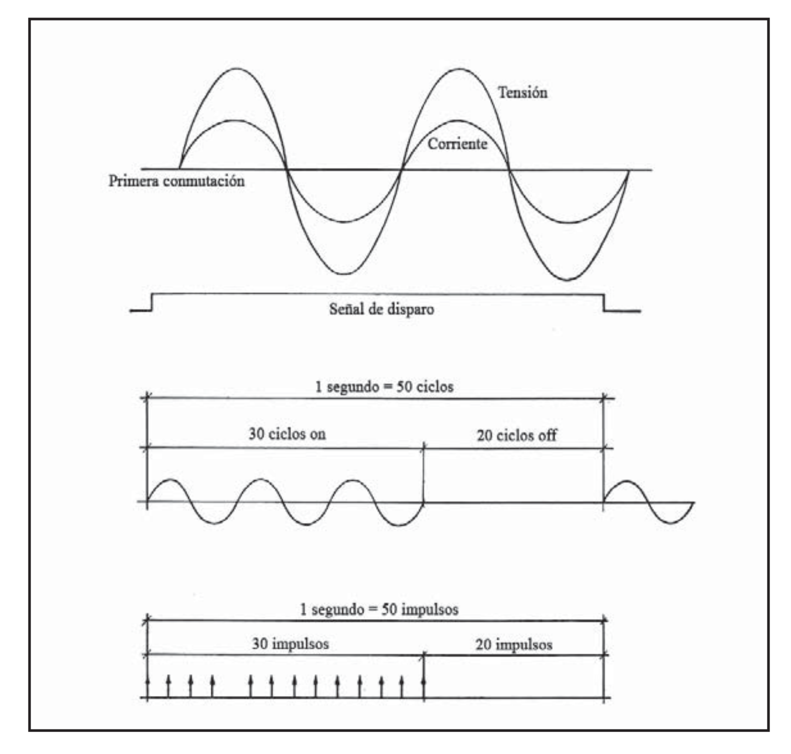


Figura 8.64 Circuito de encendido por cruce de cero

Las condiciones más desfavorables de funcionamiento se tienen en el arranque, ya que al aplicar la tensión total pasa una corriente excesiva, lo cual acorta la vida útil del elemento calefactor y sobrecarga el equipo de protección.

El tiristor necesita también una protección contra tensiones transitorias y fusibles como protección contra sobrecorrientes.

Los rectificadores de silicio controlado van provistos de indicadores del porcentaje de corriente de carga graduados del 0%-100%, de un conmutador automático manual y de un mando manual para el ajuste de la carga.

Las características de aplicación de los SCR son las siguientes:

- Ganancia extremadamente alta con un límite de 10.000 o superior.
- Su linealidad es excelente, de ± 2% en todo el campo de medida.
- Su salida mínima es de 0 V. Ello indica que la potencia de alimentación a la carga puede anularse completamente.
- Bajas caídas de tensión de modo que, a la carga, puede aplicársela del 96% al 99 % de la tensión de línea.

- El tiempo de respuesta es corto, del orden de varios ciclos (1/50 s).
- Son de pequeño tamaño.
- Necesitan una protección contra corrientes transitorias.
- Su potencia nominal debe disminuirse si aumenta la temperatura de servicio.



Figura 8.65 *Horno con controlador de temperatura actuando sobre un SCR. Fuente: Grieve*

8.2.2 Bombas dosificadoras

Las *bombas dosificadoras* (figura 8.66) son accionadas por actuadores neumáticos o electrónicos y utilizadas, principalmente, en el envío de cantidades precisas de líquidos para mezclas, en casos tales como el control de pH, tratamiento de aguas, adición de productos en la industria alimenticia, etc., aplicaciones que se caracterizan por bajos caudales, altas presiones, altas viscosidades, etc.

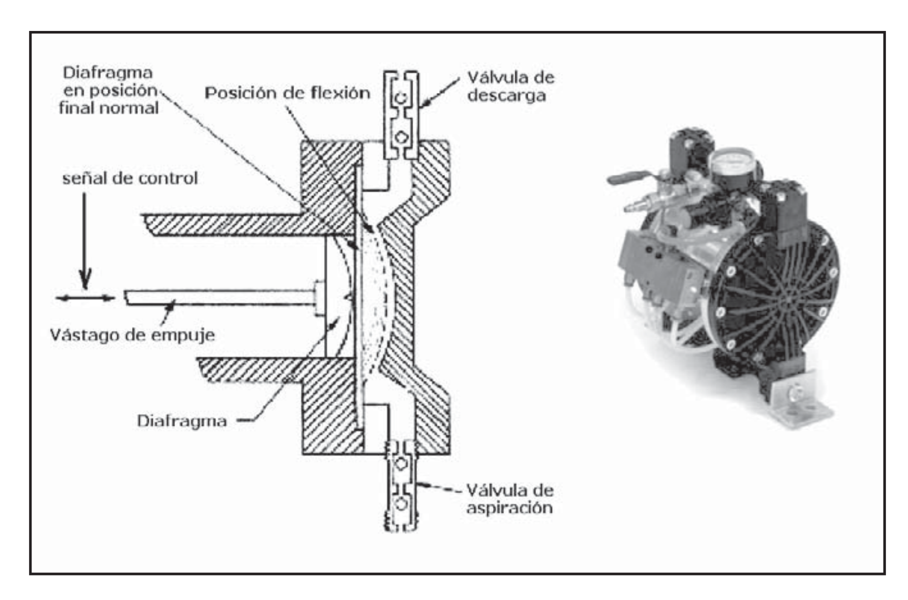


Figura 8.66 Bombas dosificadoras

8.2.3 Actuadores de velocidad variable

Los *actuadores de velocidad variable* (figura 8.67) gobiernan la velocidad de bombas centrífugas, ventiladores, compresores, etc., variando así el caudal de fluido y evitando la pérdida de energía que absorben las válvulas de control. El convertidor se alimenta con la potencia de la corriente alterna de la red y la convierte en una tensión o frecuencia variables de c.a. Se controla con la señal clásica de 4-20 mA c.c. o 0-10 V c.c. La señal de salida del convertidor de frecuencia es una onda senoidal simulada que controla la velocidad de un motor de inducción asíncrono.

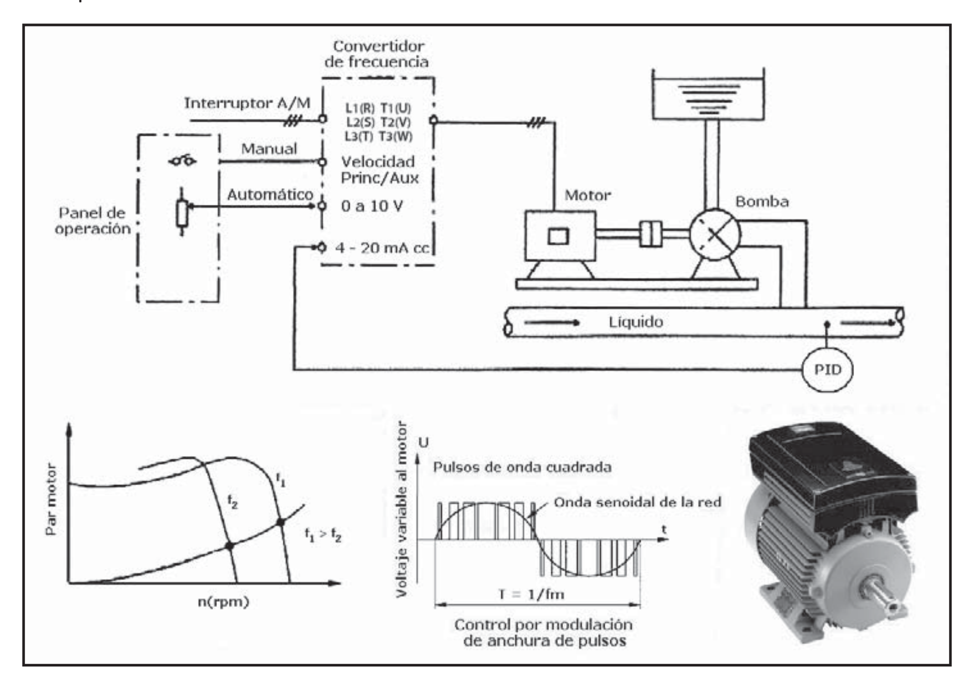


Figura 8.67 Convertidor de frecuencia alimentando un motor

Trabajan con convertidores de frecuencia que controlan el par y la velocidad de los motores de inducción y acoplan la curva de la bomba a la pérdida de carga del sistema.

La bomba es lenta en respuesta dinámica y su sistema de control es más caro, así como sus eventuales reparaciones, y presenta impactos potenciales sobre el sistema eléctrico de distribución debido a los armónicos que produce. Además, si el controlador envía una señal de control baja, la bomba, al girar a pocas revoluciones, puede calentarse en exceso fácilmente y quemarse por poca ventilación. Hay casos en los que el empleo de una bomba de velocidad variable es adecuado, tal como en el control de fluidos corrosivos que obligarían a usar aleaciones especiales en la válvula de control. Algunas de las marcas en el mercado son Danfoss VLT 5000, Micromaster VFD y ABB VFD.

8.2.4 Elementos finales varios

Otros dispositivos finales de control son los contactores, compresores, motores eléctricos, compuertas y autotransformadores ajustables motorizados.



Capítulo 9
Regulación automática

9.1 Introducción

En los inicios de la era industrial, el control de los procesos se llevó a cabo mediante tanteos basados en la intuición y en la experiencia acumulada por el operario. Un caso típico fue el control de acabado de un producto en un horno. El operario era realmente el "instrumento de control" que juzgaba la marcha del proceso por el color de la llama, por el tipo de humo, el tiempo transcurrido y el aspecto del producto y decidía así el momento de retirar la pieza; en esta decisión influía muchas veces la suerte, de tal modo que no siempre la pieza se retiraba en las mejores condiciones de fabricación. Más tarde, el mercado exigió mayor calidad en las piezas fabricadas lo que condujo al desarrollo de teorías para explicar el funcionamiento del proceso, de las que derivaron estudios analíticos que, a su vez, permitieron realizar el control de la mayor parte de las variables de interés en los procesos.

9.2 Características del proceso

El control se realiza según el lazo de control típico formado por el proceso (por ejemplo, tanque, tuberías y bombas en el caso de nivel, e intercambiador de calor y serpentín en el caso de control de temperatura), el transmisor, el controlador y la válvula de control.

El *proceso* consiste en un sistema que ha sido desarrollado para llevar a cabo un objetivo determinado: tratamiento del material mediante una serie de operaciones específicas destinadas a llevar a cabo su transformación. Los procesos revisten las formas más diversas, desde las más simples hasta las más complejas. Una aplicación típica que consideraremos repetidamente a lo largo del texto la constituye un intercambiador de calor, tal como el de la figura 9.1.

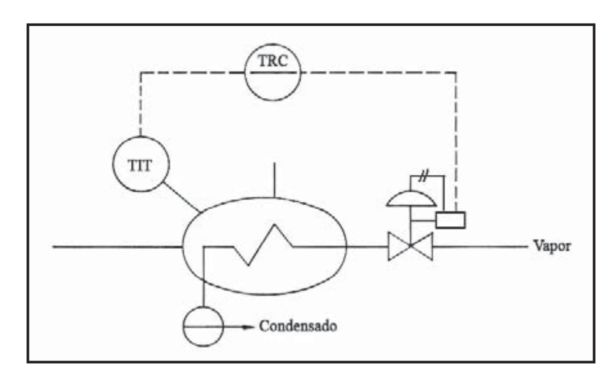


Figura 9.1 Intercambiador de calor

El *transmisor* capta la señal del proceso y la transforma a una señal neumática, electrónica o digital para enviarla al controlador.

El *controlador* permite al proceso cumplir su objetivo de transformación del material y realiza dos funciones esenciales:

a) Compara la variable medida (temperatura de salida del intercambiador) con la de referencia o deseada (punto de consigna) para determinar el error.
b) Estabiliza el funcionamiento dinámico del lazo o bucle de control mediante circuitos especiales (acciones de control, modos de control o algoritmos de control) para reducir o eliminar el error.

La *válvula de control* varía el caudal del fluido de control (vapor de agua) que, a su vez, modifica el valor de la variable medida (temperatura).

En el diagrama de bloques de la figura 9.2 puede verse que hay una cadena cerrada de señales que pasan por transmisor-controlador-válvula de control-proceso, formando lo que se llama *lazo cerrado* de control.

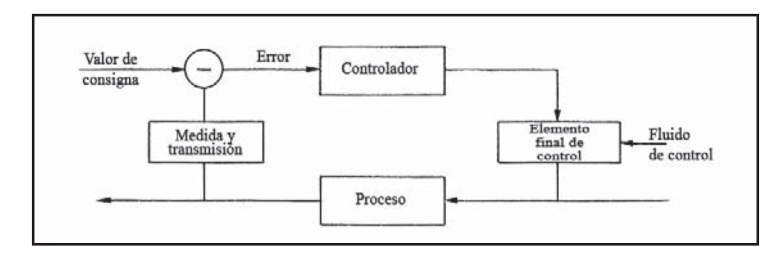


Figura 9.2 Diagrama de bloques

Un circuito o *lazo abierto* de control carece de detector de señal de error y de controlador. Un ejemplo puede consistir en el calentamiento de agua en un tanque por medio de un intercambiador con una resistencia eléctrica sumergida. Dadas una tensión de alimentación, una temperatura de entrada de agua, unas condiciones externas y una demanda de agua constante, la temperatura de salida del agua permanecerá constante. Si cambia cualquiera de estas condiciones, la temperatura de salida del agua debe variar.

El control puede ser *manual* o *automático*.

En el *control manual* del proceso (figura 9.3), el operador nota la temperatura de salida del agua (con la mano) o la percibe por la lectura de un termómetro y acciona manualmente la válvula de control de vapor, para mantener el agua a la temperatura deseada.

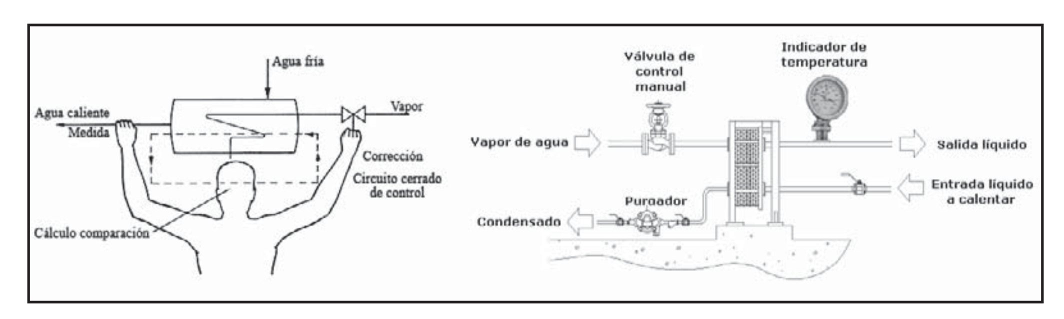


Figura 9.3 Control manual del proceso

Supongamos que la temperatura está estabilizada y que, en un momento dado, se presenta un aumento en el caudal de agua por aumento de la demanda. Como la válvula de vapor sigue estando en la misma posición, el intercambiador no llegará a calentar el mayor caudal de agua fría de entrada, por lo cual, la temperatura de salida deberá disminuir.

Ahora bien, debido a la inercia del proceso, pasará cierto tiempo hasta que el agua más fría alcance la mano del operador. Cuando éste nota la disminución de temperatura, debe compararla con la temperatura que desea y calcular mentalmente cuantas vueltas debe dar a la válvula de vapor y en qué sentido, y a continuación realizar esta corrección manual en la misma.

Pasa cierto tiempo hasta que los efectos de corrección de la válvula se notan en la temperatura de salida y pueden ser captados por el operador. Sólo entonces, éste es capaz de saber si su primera corrección ha sido escasa o excesiva. En este punto efectuará una segunda corrección y realizará una tercera, y así sucesivamente.

Esta serie de operaciones de medida, comparación, cálculo y corrección constituyen una cadena cerrada de acciones. El conjunto de elementos en circuito cerrado que hace posible este control recibe el nombre de *lazo*, *bucle* o *anillo de control (loop control)*.

Los procesos presentan dos características principales que deben considerarse al automatizarlos:

a) Los cambios en la variable controlada (temperatura) debido a alteraciones en las condiciones del proceso (*cambios de carga*). La carga del proceso es la cantidad total del fluido, o agente de control, que el proceso requiere en cualquier momento para mantener unas condiciones de trabajo equilibradas. En el ejemplo del intercambiador de calor es necesaria una determinada cantidad de vapor que se condense en el intercambiador para mantener el producto (agua) a una temperatura dada.

   En general, lo*s cambios de carga* del proceso son debidos a las siguientes causas:

   1. Mayor o menor demanda del fluido de control por el medio controlado. En el ejemplo del intercambiador de calor, un aumento en el caudal de agua o una disminución en su temperatura, da lugar a un cambio de carga porque requiere el consumo de más cantidad de vapor.
   2. Variaciones en la calidad del fluido de control. Una disminución de presión en el vapor da lugar a un aumento del caudal en volumen del vapor para mantener la misma temperatura controlada, ya que las calorías cedidas por el vapor al condensarse disminuyen al bajar la presión.
   3. Cambios en las condiciones ambientales. Son muy claros en el caso de instalaciones al aire libre donde las pérdidas de calor por radiación varían mucho según la estación del año, la hora del día y el tiempo.
   4. Calor generado o absorbido por las reacción química del proceso (procesos exotérmico o endotérmico, respectivamente). Se presenta un cambio de carga porque el proceso necesita una menor o una mayor cantidad del agente de control.

   Los cambios en la carga del proceso pueden producir perturbaciones en la alimentación y en la demanda.

   Las perturbaciones en la alimentación consisten en un cambio en la energía o en los materiales de entrada al proceso. Por ejemplo, las variaciones en la presión del agua fría de entrada.

Las perturbaciones en la demanda consisten en un cambio en la salida de energía o de material del proceso. Los cambios en la presión del vapor de agua o las variaciones de la demanda de agua caliente pertenecen a este tipo.

b) El tiempo necesario para que la variable de proceso alcance un nuevo valor al ocurrir un cambio de carga. Este *tiempo de retardo* se debe a una o varias propiedades del proceso: capacitancia, resistencia y tiempo de transporte.

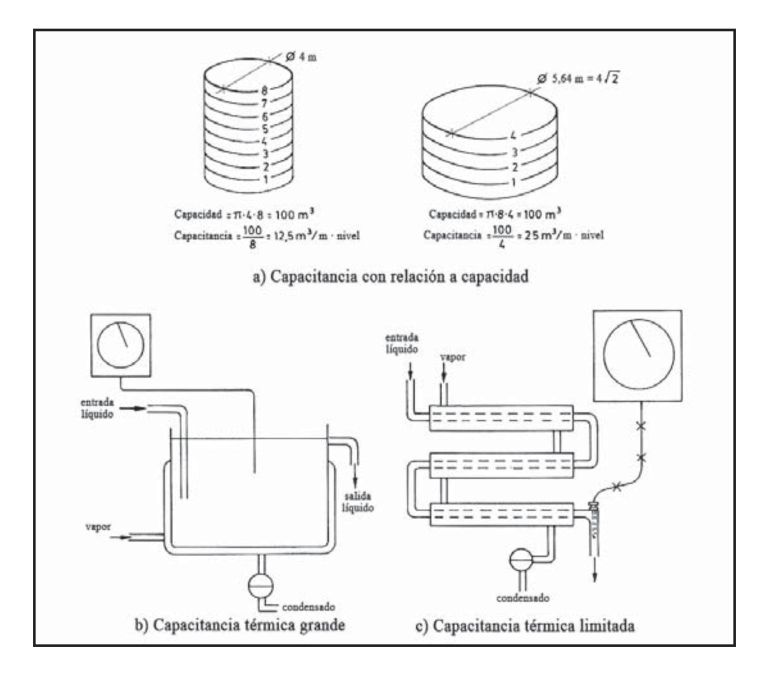


Figura 9.4 Capacitancia

La *capacitancia* es una medida de las características propias del proceso para mantener o transferir una cantidad de energía, o de material, con relación a una cantidad unitaria de alguna variable de referencia. Por ejemplo, dos depósitos cilíndricos de 100 m^3 de capacidad con diámetros de 4 m (altura 8 m) y 5,64 m (altura 4 m) tienen capacitancias respectivas de 100/8 = 12,5 m^3/m nivel y 100/4 = 25 m^3/m nivel. En un proceso, una capacitancia relativamente grande es favorable para mantener constante la variable controlada, pero esta misma característica hace que sea más difícil cambiar la variable a un nuevo valor e introduce un retardo importante. Si en el intercambiador de calor de la figura 9.4b, su capacitancia es grande (10 m^3 de serpentín/m^3 de caudal de agua caliente) resistirá las perturbaciones que pueden presentarse en la presión del vapor de agua o en la temperatura del agua caliente. En cambio, si la capacitancia es pequeña (1 m^3 de serpentín/m^3 de caudal de agua caliente) las mismas perturbaciones influirán poderosamente en la temperatura del agua caliente a la salida.

La *resistencia* es la oposición total o parcial de la transferencia de energía o de material entre las capacitancias. En la figura 9.5, la capacitancia es el serpentín de vapor y la resistencia se manifiesta porque las paredes de los tubos del serpentín y las capas aislantes de agua caliente y vapor que se encuentran a ambos lados del serpentín se oponen a la transferencia de energía calorífica.

El *tiempo de transporte* es el tiempo necesario para transferir las variaciones de la temperatura del agua a la salida del intercambiador hasta la sonda de temperatura. Depende de la velocidad de transporte y de la distancia de transporte.

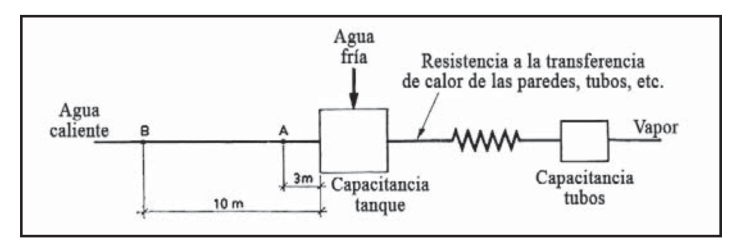


Figura 9.5 Capacitancia, resistencia, tiempo de transporte

Si en la figura 9.5, el agua circula con una velocidad de 1 m por segundo y con el bulbo a 3 m del tanque, el tiempo de transporte es de 3 segundos. Si el bulbo está en el punto B, a 10 m del tanque, el tiempo será de 10 segundos. Pero si la velocidad del agua es de 0,5 m por segundo el tiempo es de 6 y 20 segundos, respectivamente.

La situación de la válvula de control puede contribuir también al tiempo muerto de transporte, en particular en el caso de un horno tubular rotativo empleado en la industria cementera, en el que el producto debe pasar a través de varios cientos de metros del horno y tiene un tiempo de residencia de 3 horas a 10 minutos. El tiempo de transporte retarda la reacción del proceso, existiendo un tiempo muerto durante el cual el controlador no actúa ya que para iniciar una acción de corrección debe presentársele una desviación primero. Sin embargo, como al cabo de algunas horas el proceso alcanza un estado de equilibrio, el producto es transformado de forma controlada. El horno está en funcionamiento continuo durante meses.

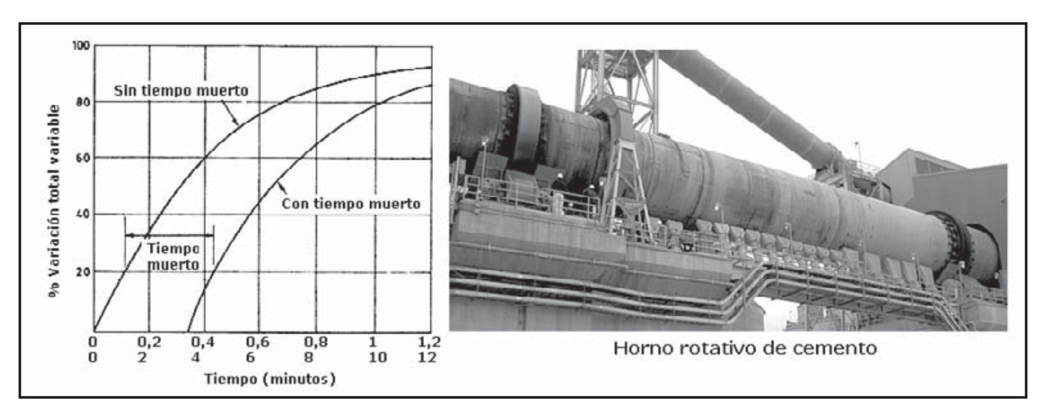


Figura 9.6 Efecto del tiempo de transporte

Los tiempos muertos son una de las mayores dificultades para el control de las variables de los procesos industriales, por lo que deben evitarse o reducirse siempre que sea posible. Por ejemplo, en el caso de un intercambiador, el papel del proyectista es hacer mínima la capacidad del intercambiador, para conseguir, a través del serpentín, el máximo rendimiento en la transferencia de calor entre el vapor y el líquido, y situar la sonda de temperatura lo más próxima posible al punto ideal de calentamiento del fluido. Incluso puede ocurrir que un proceso sea incontrolable debido a los tiempos muertos.

El *control manual*, aparte de la necesidad de un operador que vigile periódicamente el proceso, puede emplearse en la puesta en marcha del proceso, o bien excepcionalmente, en aplicaciones críticas en las que el control automático no funciona correctamente (caso de algunos procesos exotérmicos difíciles) y en aplicaciones no críticas, donde la existencia de pequeños cambios en la variable, sólo repercute en variaciones pequeñas y lentas en el proceso, y se dispone del tiempo suficiente para que el operador pueda realizar una corrección antes de que la variable se aparte considerablemente del punto de consigna.

9.3 Tipos de control

En el control manual del ejemplo de la figura 9.3, el operador puede hacer las correcciones en la válvula de vapor de varias formas:

1. Puede abrir o cerrar instantáneamente la válvula.
2. Puede abrir o cerrar la válvula lentamente, a una velocidad constante, mientras se mantenga la desviación.
3. Puede abrir la válvula en mayor grado cuando la desviación es más rápida.
4. Puede abrir la válvula un número de vueltas constante, por cada unidad de desviación.

Asimismo, el operador puede emplear otros métodos o combinaciones en la manipulación de la válvula.

En los sistemas industriales se emplea, básicamente, uno o una combinación de los siguientes sistemas de control:

a. De dos posiciones (todo-nada).
b. Flotante.
c. Proporcional de tiempo variable.
d. Proporcional.
e. Proporcional + integral.
f. Proporcional + derivada.
e. Proporcional + integral + derivada.

9.3.1 Control todo-nada

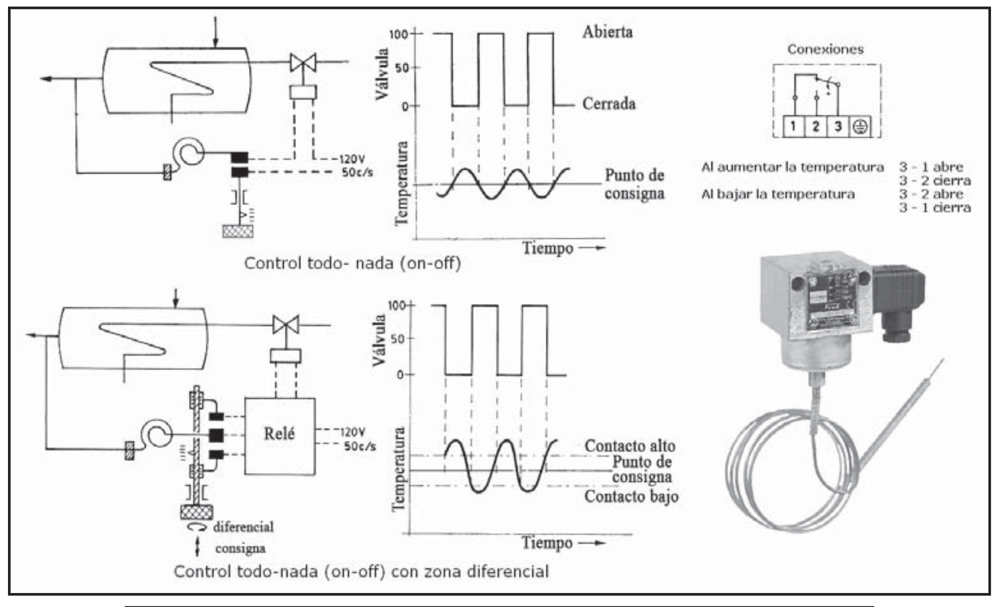
En la regulación *todo-nada*, la válvula de control adopta únicamente dos posiciones, abierta o cerrada, para un valor único de la variable controlada. Este tipo de control se caracteriza por un ciclo continuo de variación de la variable controlada.

El control todo-nada se emplea, usualmente, con una banda diferencial o zona neutra, dentro de la cual el elemento final de control permanece en su última posición, para valores de la variable comprendidos dentro de la banda diferencial. Los ajustes de control se basan en variar el punto de consigna y la gama diferencial.

El control todo-nada funciona satisfactoriamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo. Se caracteriza porque las dos posiciones extremas de la válvula permiten una entrada y salida de energía al proceso ligeramente superior e inferior, respectivamente, a las necesidades de la operación normal.

Es evidente que la variable controlada oscila continuamente y que estas oscilaciones variarán, en frecuencia y magnitud, si se presentan cambios de carga en el proceso.

En la figura 9.7 se observa que el controlador es un termostato que cierra o abre un contacto eléctrico excitando el elemento final de control que es una válvula de solenoide con dos posiciones únicas, cerrada y abierta. Y, en la misma figura, puede verse un caso real de calentamiento de un horno con resistencias eléctricas con punto de consigna 500 °C y zona diferencial el 1% del margen de control de 0-800 °C, es decir, 8 °C.



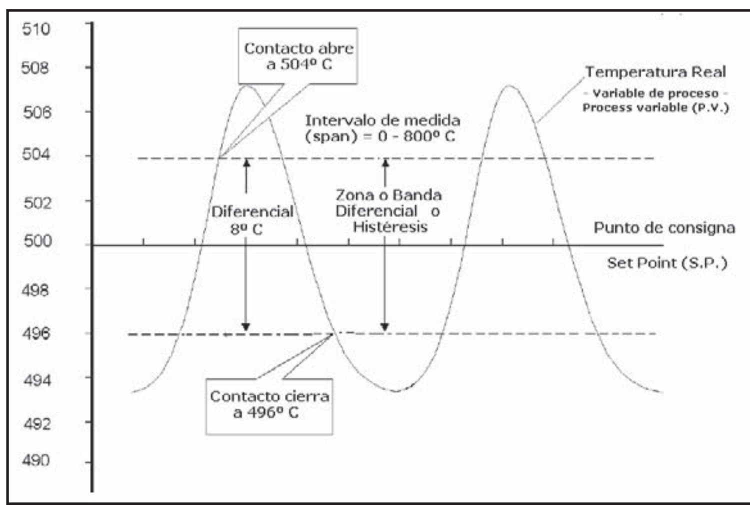


Figura 9.7 Control todo-nada. Fuente: Honeywell

El controlador podría ser también neumático, electrónico o digital con dos únicas señales de salida excitando una válvula neumática, dotada de un posicionador electroneumático o digitoneumático.

Evidentemente, sería complicado y caro frente a la simplicidad de la válvula de solenoide como elemento final de control.

9.3.2 Control flotante

El *control flotante*, denominado realmente control flotante de velocidad constante (figura 9.8a), mueve el elemento final de control a una velocidad única independiente de la desviación. Por ejemplo, una regulación todo-nada puede convertirse en una regulación flotante si se utiliza una válvula motorizada reversible de baja velocidad (con un tiempo de recorrido de 1 minuto, o más, desde la posición abierta a la cerrada o viceversa).

El control flotante de velocidad constante con una zona neutra (figura 9.8b) se obtiene al acoplar a un control todo-nada con una zona neutra una válvula motorizada reversible de baja velocidad. La válvula permanece inmóvil si la variable queda dentro de la zona neutra y cuando la rebasa, la válvula se mueve en la dirección adecuada hasta que la variable retorna al interior de la zona neutra, pudiendo la válvula incluso llegar a alcanzar sus posiciones extremas de apertura o de cierre.

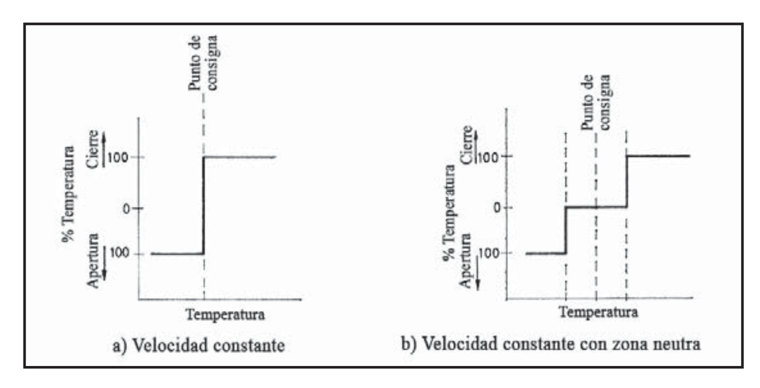


Figura 9.8 Control flotante

El control flotante, análogamente al control todo-nada, tiende a producir oscilaciones en la variable controlada, pero estas oscilaciones pueden hacerse mínimas eligiendo adecuadamente la velocidad del elemento final para que compense las características del proceso. En general, la válvula debe moverse a una velocidad lo suficientemente rápida para mantener la variable ante los cambios más rápidos de carga que puedan producirse en el proceso.

La ventaja principal del control flotante es que puede compensar los cambios de carga lentos del proceso desplazando, gradualmente, la posición de la válvula. Sin embargo, no es adecuado si hay un retardo importante o si los cambios de carga, aunque sean pequeños, son muy rápidos.

9.3.3 Control proporcional de tiempo variable

En este sistema de regulación existe una relación predeterminada entre el valor de la variable controlada y la posición media en tiempo del elemento final de control de dos posiciones. Es decir, la relación del tiempo de conexión al de desconexión final es proporcional al valor de la variable controlada. La longitud de un ciclo completo (conexión + desconexión) es constante pero la relación entre los tiempos de conexión a desconexión, dentro de cada ciclo, varía al desviarse la variable controlada del punto de consigna.

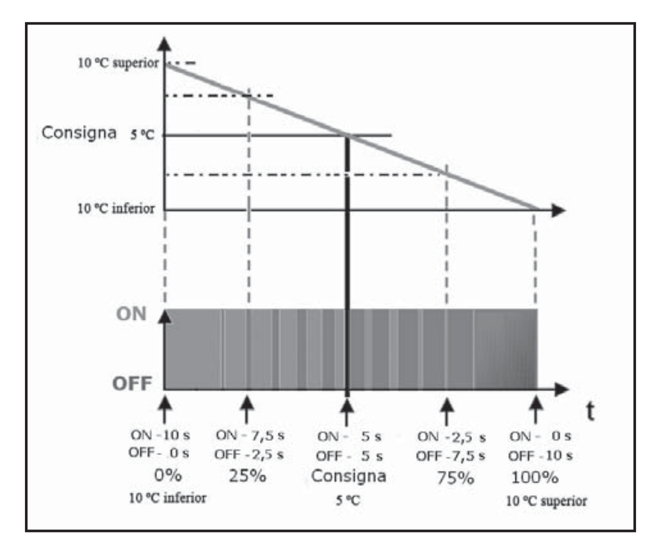


Figura 9.9 Control proporcional de tiempo variable

El controlador de la figura 9.9 tiene un ciclo completo de 10 segundos y un margen de actuación de 20 °C. En el punto de consigna de 10 °C el controlador conecta el elemento final durante 5 segundos y lo desconecta 5 segundos y así sucesivamente. Si la temperatura disminuye 10 °C, el elemento final está siempre conectado, mientras que si aumenta 10 °C está desconectado. A 5 °C por encima del punto de consigna, el elemento final está conectado sólo 2,5 segundos, desconecta durante 7,5 segundos, y así sucesivamente.

Este tipo de control se emplea usualmente en controladores eléctricos. Un caso típico de aplicación lo constituye la regulación de temperatura de un horno eléctrico en que el elemento final es una resistencia o un conjunto de resistencias de calefacción.

9.3.4 Control proporcional

En el sistema de posición proporcional existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Es decir, la válvula se mueve el mismo valor por cada unidad de desviación. O, en otras palabras, la posición de la válvula es una copia inversa de la variable controlada.

En la figura 9.10 puede verse la forma en que actúa un controlador proporcional cuyo punto de consigna es 50 °C y cuyo intervalo de actuación es de 0-100 °C. Cuando la variable controlada está en 0 °C o menos, la válvula está totalmente abierta; a 100 °C o más está totalmente cerrada, y entre 0 y 100 °C la posición de la válvula es proporcional al valor de la variable controlada. Por ejemplo, a 25 °C está abierta en un 75% y a 50 °C en un 50%.

El grado de ajuste del controlador proporcional viene definido por:

Ganancia, que es la relación entre la variación de la señal de salida del controlador a la válvula de control y la variación de la señal de entrada procedente del elemento primario o del transmisor. Por ejemplo, una ganancia de 2 seleccionada en un controlador de temperatura, con señal de entrada procedente de un transmisor de 0-100 °C, significa que ante un aumento en la temperatura del proceso de 40 °C a 60 °C (20% de la escala de 0-100 °C), la señal de salida a la válvula de control

cambiará un 40% (2 × 20%), es decir, que si la válvula estaba en el 60% de su carrera pasará al 20% (o sea, cerrará del 60% al 20%, lo que equivale a un cambio en su posición del 40%).

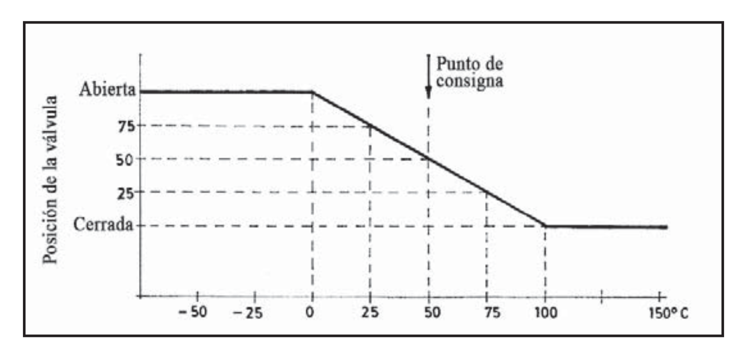


Figura 9.10 Control proporcional

Banda Proporcional, que es el porcentaje del campo de medida de la variable que la válvula necesita para efectuar una carrera completa, es decir, pasar de completamente abierta a completamente cerrada. Por ejemplo, una banda proporcional del 50% en un control de temperatura de escala 0-100 °C con punto de consigna 50 °C, indica que la temperatura debe variar desde 25 °C hasta 75 °C para que la válvula efectúe una carrera completa. Es la inversa de la ganancia. En el ejemplo anterior con ganancia de valor 2 sería del 50%, es decir 100/2 = 50%. La banda proporcional fue muy utilizada en los controladores neumáticos y en los electrónicos. Actualmente está en desuso, en favor de la ganancia.

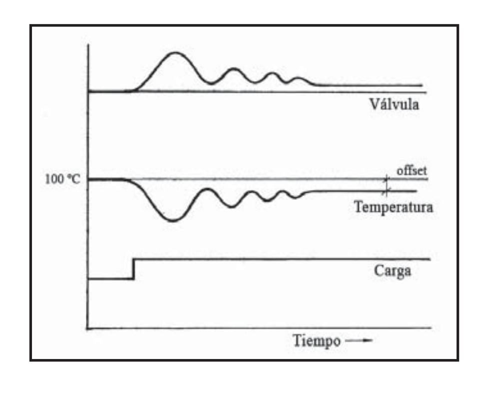
La acción proporcional tiene un inconveniente, que es la desviación permanente de la variable una vez estabilizada con relación al punto de consigna, denominada *OFFSET*.

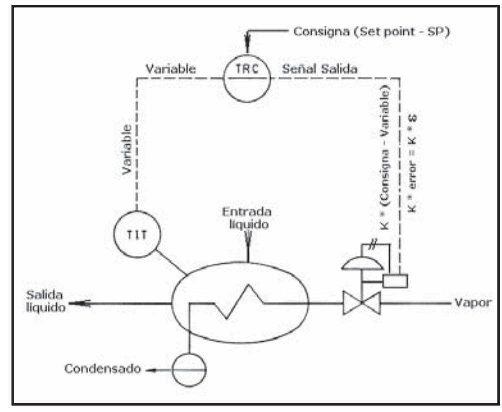
Por ejemplo, en el caso del control de temperatura del intercambiador de calor de la figura 9.11, sería una casualidad que el calor necesario para mantener la variable en un punto de consigna del 50% de la escala, fuera exactamente el 50% de las calorías aportadas por el agua caliente a la temperatura de trabajo, es decir, que correspondiera exactamente a la posición del 50% de la carrera de la válvula de control.

Otra forma de verlo es suponer que inicialmente la variable coincide con el punto de consigna (50 °C) con una posición de la válvula de control del 50% de la carrera para un consumo de agua caliente de 100 l/h. Si se presenta un cambio de carga en el consumo de valor 200 l/h de agua caliente, es obvio que la temperatura final de equilibrio no coincidirá con la inicial de 50 °C, puesto que si no fuera así, por las características del control proporcional, la posición de la válvula sería la inicial (50%), lo cual es imposible, ya que en esta posición se ha presentado la disminución de temperatura inicial y existiría el absurdo de mantener la misma temperatura de salida con las válvula de control en la misma posición, dando el mismo paso de caudal de vapor tanto para el consumo de agua caliente en el régimen inicial como para el aumento de este consumo.

De aquí que la temperatura aumentará o disminuirá con relación al punto de consigna hasta que el proceso se equilibre, para el cual, existirá una diferencia entre el punto de consigna y la variable controlada (*offset*).

Otro ejemplo para comprender el fenómeno del *offset* es el control de nivel de un tanque (figura 9.12) en el que la válvula de control se encuentra en la impulsión de la bomba de descarga del tanque.





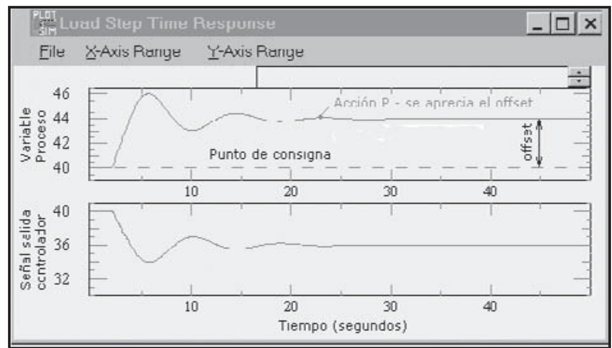


Figura 9.11 Control proporcional con offset. Fuente: ExpertTune

La señal de salida del transmisor de nivel es de 4-20 mA c.c. y llega al controlador electrónico donde se compara con el punto de consigna.

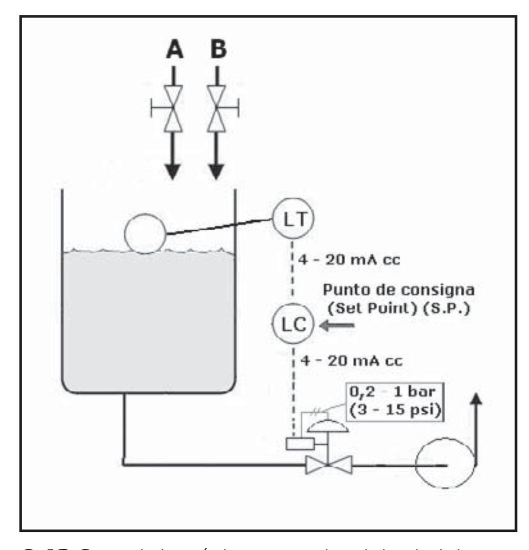


Figura 9.12 Control electrónico proporcional de nivel de un tanque

Si la ganancia g del controlador es la unidad, la válvula hace todo su recorrido de abierta a cerrada para el 100% de cambio de nivel del tanque. Pero si, por ejemplo, la ganancia es 2, la válvula efectúa toda su carrera para la mitad del nivel. En este último caso, si el punto de consigna es el 50%, se entiende que la válvula estará cerrada para el 25% del nivel y abierta para el 75% del nivel del tanque.

Sólo para unas condiciones determinadas, el nivel deseado (punto de consigna) coincide con el nivel real. En efecto, supongamos que las dos válvulas de alimentación A y B están abiertas y que el nivel coincide con el punto de consigna que es del 50%. Si ahora se cierra la válvula B, al haber menor aportación de líquido, el nivel bajará, con lo cual, la válvula empezará a cerrar para que el nivel se recupere, después se presentarán algunas oscilaciones, pero al final, cuando se estabilice, el nivel será inferior al 50%, lo cual parece ilógico,ya que no es creíble que si deseamos el nivel al 50%, éste se estabilice en otro valor distinto. Suponemos pues que el nivel vuelve al 50%, con lo cual, al ser el control proporcional, la válvula de control volverá de nuevo a la posición correspondiente al 50% de su carrera. Pero esto no puede cumplirse ya que ahora está abierta una sola válvula de aportación, mientras que antes, con el nivel y la válvula de control también en el 50%, las dos válvulas de aportación estaban abiertas. El fenómeno descrito de diferencia estable entre el punto de consigna y la variable es el que se ha descrito con el nombre de *offset*.

El *offset* puede reducirse disminuyendo la banda proporcional, con la salvedad de que esta disminución no debe producir inestabilidad en el proceso.

La desviación puede eliminarse reajustando manualmente el punto de consigna. Sin embargo, una nueva perturbación que se produzca en el proceso provocará un nuevo *offset*.

9.3.5 Control proporcional + integral

El *control integral* actúa cuando existe una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando dicha desviación en el tiempo y sumándola a la acción de la proporcional.

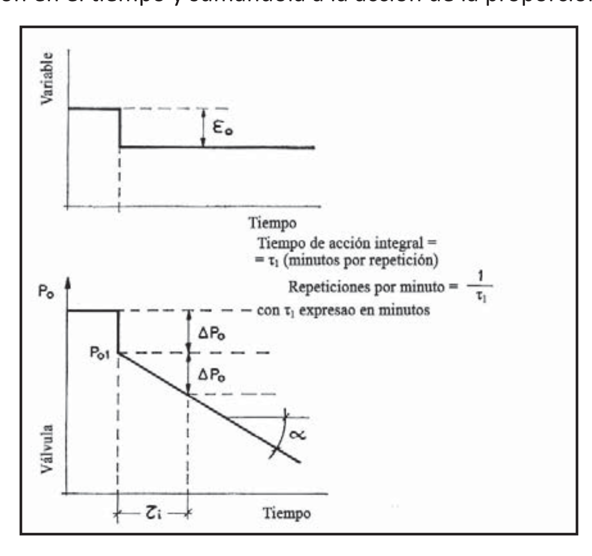


Figura 9.13 Respuesta a un escalón del controlador PI

Se caracteriza por el llamado *tiempo de acción integral* en *minutos por repetición* (o su inversa *repeticiones por minuto*) que es el tiempo en que, ante una señal en escalón, la válvula repite el mismo

movimiento correspondiente a la acción proporcional. Como esta acción de control se emplea para obviar el inconveniente del *offset* (desviación permanente de la variable con respecto al punto de consigna) de la acción proporcional, sólo se utiliza cuando es preciso mantener un valor de la variable que iguale siempre al punto de consigna.

En la figura 9.13 puede verse la respuesta ante una entrada en escalón de un controlador proporcional + integral y la obtención gráfica de τ_i (minutos/repetición).

Si en un lazo de control de temperatura de margen 0-100 °C, de ganancia 2 (banda proporcional 50%), el tiempo de acción integral es de 1 minuto/repetición y la temperatura está estabilizada en el punto de consigna de 50 °C, un nuevo punto de consigna de 60 °C (que representa el 10% de variación respecto a la escala del instrumento) dará lugar a un movimiento inmediato del índice de la señal a la válvula de control del 20% (debido a la acción proporcional) y, después, este índice se desplazará a una velocidad lenta (a causa de la acción integral), tal que al cabo de 1 minuto habrá repetido el 20% del movimiento inicial provocado por la acción proporcional.

En la figura 9.14 puede verse las curvas de la acción proporcional + integral cuando hay un cambio de carga en el proceso.

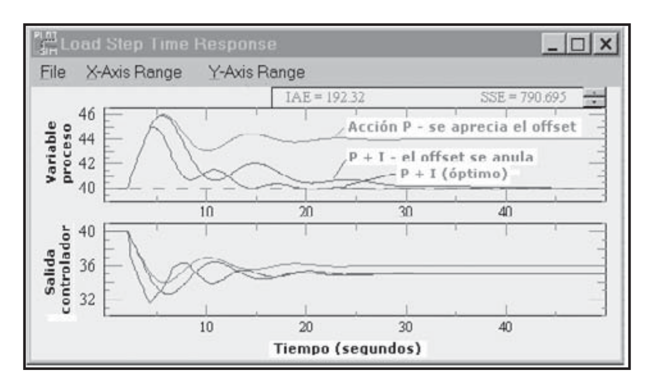


Figura 9.14 Respuesta del controlador PI a un cambio de carga. Fuente: ExpertTune

Existe un fenómeno denominado "*saturación integral*" (*integral windup*) (figura 9.15) que se presenta cuando la variable queda fuera de los límites de la banda proporcional. La acción continuada del integrador da lugar a que la señal de salida a la válvula de control se sature y tenga su valor máximo (o mínimo). Entonces, la variable debe cruzar el punto de consigna para que, al cambiar de signo la desviación, varíe la señal de salida del controlador y la válvula inicie su cierre (o apertura). El resultado es una gran oscilación de la variable, que puede prevenirse eliminando la acción integral (el integrador deja de actuar) cuando la variable cae fuera de la banda proporcional. Esta función se llama "*desaturación integral*" y, en general, es utilizada en los procesos discontinuos (*batch*).

Un ejemplo ilustrativo de estos procesos es el reactor discontinuo. Su operación consiste en la carga de los productos a transformar que se someten a un programa de temperaturas determinado y, cuando la reacción finaliza, el operador descarga el reactor.

Durante la fase de descarga y nueva carga del reactor, la temperatura del proceso disminuye, apartándose del punto de consigna, con lo cual la desviación subsiguiente hace actuar la acción integral que, al cabo de poco tiempo, lleva la válvula a la posición de completa abertura. Al cargar los productos para el nuevo ciclo, la temperatura sube rápidamente ya que la válvula de vapor está

completamente abierta, y sólo empieza a disminuir cuando la temperatura cruza el punto de consigna ya que entonces, y sólo entonces, la desviación con relación a la variable pasa a ser de signo contrario. De este modo, la acción integral inicia la resta y disminución de las áreas de desviación que tenía sumadas, con lo que la válvula de control empieza a cerrarse.

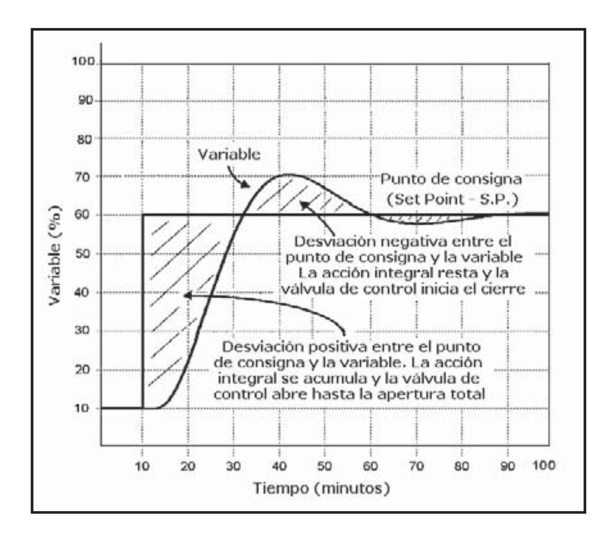


Figura 9.15 *Saturación integral*

Una característica particular que presentan los controladores de acción proporcional + integral, en la puesta en marcha del proceso, es el rebasamiento del punto de consigna. Sea por ejemplo, el caso del control de temperatura de un horno.

El rebasamiento del punto de consigna se presenta porque la unidad integradora empieza a actuar cuando la temperatura llega al límite inferior de la banda proporcional, y continúa actuando mientras la temperatura no alcance el punto de consigna.

Durante todo este tiempo, la acción integral ha elevado ya la señal a la válvula de control, provocando una aportación de calor excesiva. Cuando la temperatura rebasa el punto de consigna, se invierte el signo de la señal de desviación, y el integrador hace disminuir la señal a la válvula de control, en un valor conveniente para eliminar el *offset*.

9.3.6 Control proporcional + derivado

En la regulación *derivada* existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Es decir, el *control derivativo* actúa cuando existen cambios en la variable. Esta actuación es proporcional a la pendiente de la variable, es decir, a su derivada. En la figura 9.16 puede verse el movimiento de la válvula de control ante los cambios en la variable provocados por un cambio de carga.

La acción derivada se caracteriza por el llamado *tiempo de acción derivada* en *minutos de anticipo* que es el intervalo durante el cual, la variación de la señal de salida del controlador, debida a la acción proporcional, iguala a la parte de variación de la señal debida a la acción derivativa cuando se aplica una señal en rampa al instrumento.

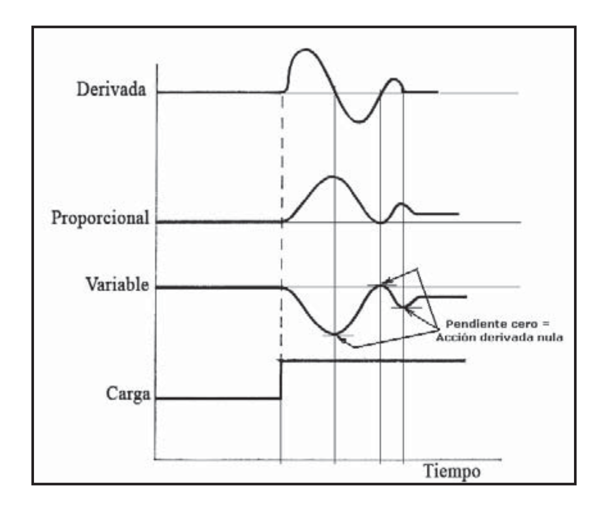


Figura 9.16 Control proporcional + derivado

En el ejemplo de control de temperatura de la figura 9.11, si la temperatura cambia en forma de rampa (figura 9.17), su derivada es una constante (tangente del ángulo de la pendiente) que, sumada a la acción proporcional, genera la recta inclinada *PD* (proporcional + derivada). Si la acción derivada es de 1 minuto, la posición de la válvula se anticipará en 1 minuto a la que tendría normalmente por la acción proporcional. Es decir, trazando una paralela al eje de tiempos (eje horizontal de abscisas) de modo que corte a las rectas *PD* (suma de la proporcional + derivada) y *P* (proporcional), la distancia horizontal que separa los puntos de corte es igual a 1 minuto (tiempo de anticipo de la válvula).

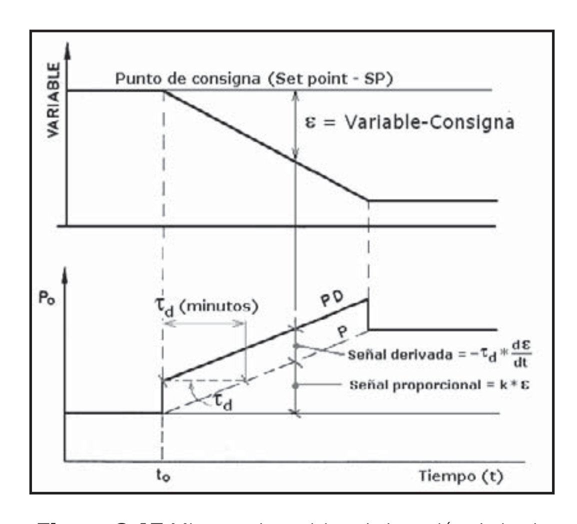


Figura 9.17 Minutos de anticipo de la acción derivada

La acción derivada es adecuada cuando hay retraso entre el movimiento de la válvula de control y su repercusión en la variable controlada. No obstante, un tiempo de acción derivada demasiado grande, da lugar a que la variable cambie demasiado rápidamente y rebase el punto de consigna con una oscilación que puede ser amortiguada o no. Es decir, una acción derivada demasiado grande puede dar

lugar a inestabilidades en el proceso (figura 9.18). Un tiempo de acción derivada que sea demasiado pequeño permite que la variable esté oscilando demasiado tiempo con relación al punto de consigna. El tiempo óptimo de acción derivativa es aquél que retorna la temperatura al punto de consigna con el mínimo de oscilaciones.

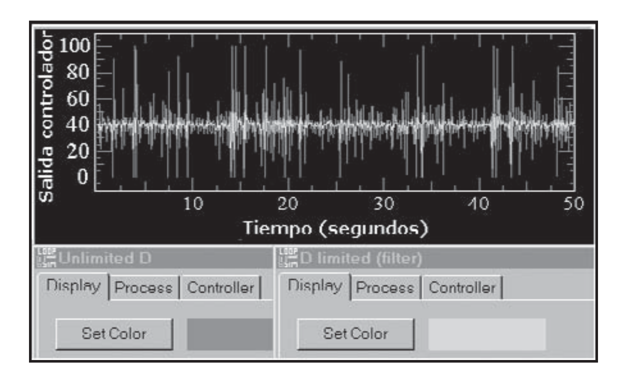


Figura 9.18 Acción derivada excesiva con oscilaciones a la salida del controlador y un filtro de las oscilaciones. Fuente: ExperTune

La aplicación de la acción derivada permite aumentar la ganancia del controlador durante los cambios de la variable, lo que compensa parte del retardo inherente al proceso y permite el uso de una ganancia más grande (banda proporcional más pequeña) con un *offset* menor.

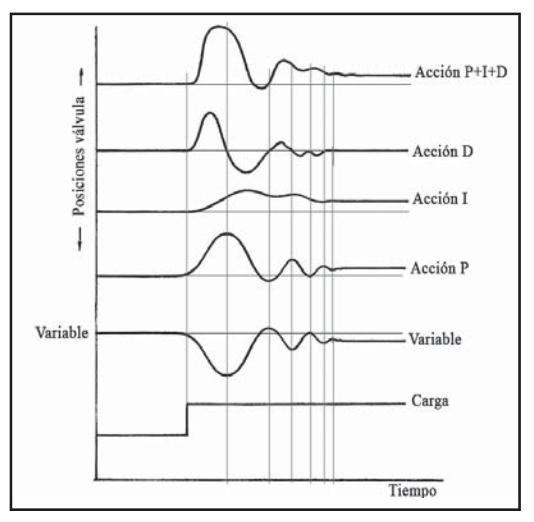
La acción derivada puede ayudar a disminuir el rebasamiento de la variable durante el arranque del proceso y puede emplearse en sistemas con tiempos de retardo considerables porque permite una recuperación rápida de la variable después de presentarse una perturbación en el proceso.

Ahora bien, la posición anticipada en el tiempo de la válvula de control, que se consigue con la acción derivada, precisa de la detección de cambios en el proceso por parte del controlador. Es como si el conductor de un automóvil, al subir una cuesta, en lugar de apretar el pedal del gas al ver a distancia el cambio de pendiente, sólo lo hiciera cuando observase en el cuentakilómetros la disminución de velocidad.

9.3.7 Control proporcional + integral + derivado

La unión en un controlador de las tres acciones p*roporcional, integral* y *derivativa (PID)* forma un instrumento controlador que presenta las siguientes características, comentadas tomando como ejemplo el controlador de temperatura del intercambiador de calor de la figura 9.11, donde suponemos que se presenta un cambio de carga por aumento de la demanda de agua caliente (figura 9.19):

1. La acción *proporcional* cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna. La señal *P* (proporcional) mueve la válvula siguiendo fielmente los cambios de temperatura multiplicados por la *ganancia*. Un aumento de la ganancia conduce a una mayor acción proporcional y un control más rápido.
2. La acción *integral* mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna. La señal *I* (integral) va sumando las áreas de diferencia entre la variable y el punto de consigna, repitiendo la señal proporcional según su τ_i (*minutos/repetición*). Una disminución del tiempo de acción integral proporciona una mayor acción integral y un control más rápido.



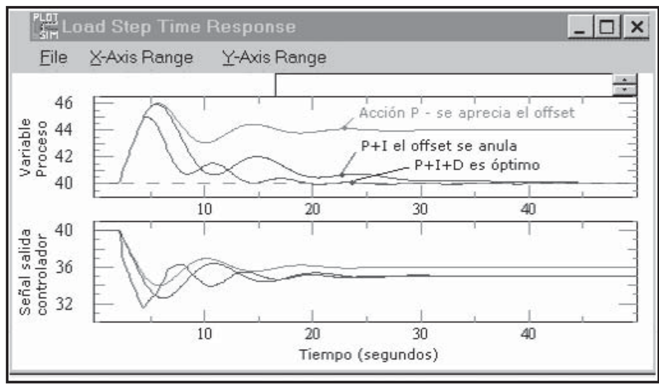


Figura 9.19 Control proporcional + integral + derivado. Fuente: ExperTune

3. La acción *derivada* corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada. La señal *D* (derivada) es la pendiente (tangente) de la curva descrita por la variable, con lo que anticipa la posición de la válvula en el tiempo debida a la acción proporcional según el valor de τ_d (*minutos de anticipo*). Un aumento del tiempo de acción derivada incrementa la acción derivada y proporciona un control más rápido.

La señal que llega a la válvula de control es, en todo momento, la suma de cada una de las señales de las acciones proporcional + integral + derivada del controlador.

9.4 Controladores neumáticos

Los instrumentos neumáticos de control están en desuso. Como ejemplo para el lector figura el esquema de un controlador *PID*, en el que pueden verse la señal de error como diferencia entre el punto de consigna y la variable medida, lo que posiciona el obturador con relación a la tobera, la ganancia (o banda proporcional) como punto de apoyo de la palanca que obtura la tobera, la acción integral como la válvula R_i y la acción derivada como la válvula R_d (figura 9.20).

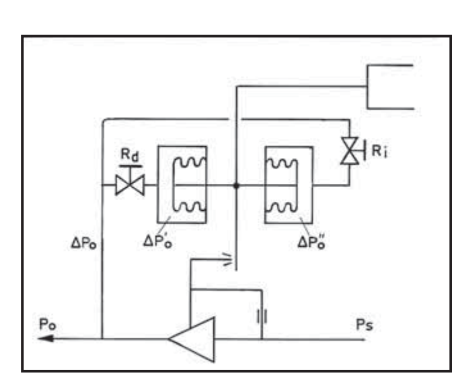




Figura 9.20 Controlador neumático PID. Fuente: Foxboro

Los instrumentos neumáticos de control están actualmente muy perfeccionados y puede afirmarse que casi han llegado a su desarrollo límite. Dotados de bloques de control de técnica fluídica modulares, disponen de acción *PID*, control en cascada, alarmas de desviación, relés de relación, interruptor para procesos discontinuos, conmutador automático-manual, etc.

Son extraíbles de su caja de alojamiento por lo que, en caso de avería, su sustitución es inmediata. Los controladores neumáticos pueden instalarse directamente en áreas peligrosas, y se mantienen funcionando aunque falle la alimentación eléctrica mientras exista aire en las tuberías de alimentación neumática de la planta. Deben alimentarse a través de un filtro manorreductor y a la presión de 1,4 bar (o 20 psi). El aire de alimentación debe ser limpio, si es posible sin aceite, suministrado por compresores con aros de grafito que no precisan de lubricación.

Su empleo ha ido disminuyendo debido a su menor exactitud, ya que carecen de las ventajas de tratamiento de las señales y de la información que poseen los sistemas digitales.

9.5 Controladores electrónicos

Los *instrumentos electrónicos de control* hacen un amplio uso del *amplificador operacional* (*OP = Operational Amplifier*). Es, usualmente, un amplificador de corriente continua (c.c.) con una ganancia en tensión en bucle abierto normalmente superior a 50.000 que, mediante la conexión de componentes adecuados y dispuestos en forma de realimentación positiva o negativa, constituye el "corazón" de los controladores electrónicos. Sólo necesita una corriente de entrada del orden de los 0,5 mA (0,0005 A) para dar lugar a un cambio total en la señal de salida (un valor próximo a la corriente de alimentación).

El símbolo utilizado para representar un amplificador operacional es un triángulo equilátero con su base vertical en la que se conectan los dos terminales de entrada, el superior es el inversor $-V_e$ y el inferior el no inversor $+V_e$, mientras que el vértice se acostumbra a situar a la derecha, conectándosele el terminal de salida.

Evidentemente, el circuito real del amplificador es más complejo y está rodeado por muchas conexiones que aunque sean necesarias, no intervienen en la función principal del amplificador.

En la figura 9.21 puede verse el esquema de un *amplificador operacional*. Se observará que las conexiones externas son dos alimentaciones $+V_s$ y $-V_s$ y dos componentes de compensación de frecuencia, cuya misión es estabilizar el amplificador. Las conexiones internas equivalen a una impedancia de entrada muy grande Z_i, definida como la relación entre la variación de tensión entre las dos entradas y la variación correspondiente de la corriente de entrada, y a una impedancia de salida Z_0 equivalente a la relación entre la variación de la tensión de salida y la variación de la corriente de salida correspondiente.

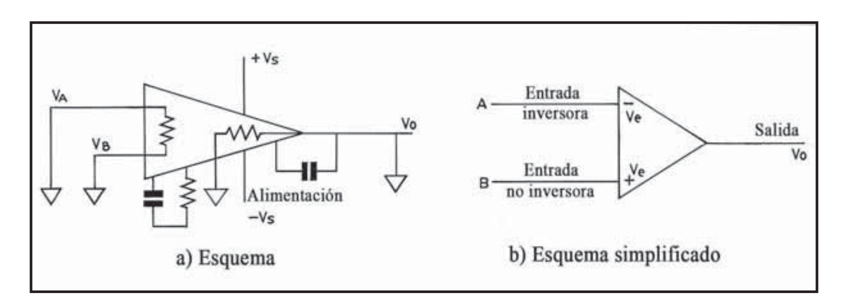


Figura 9.21 Amplificador operacional

9.5.1 Controlador todo-nada

El amplificador operacional puede utilizarse como un *controlador todo-nada* (figura 9.22) gracias a la alta ganancia del amplificador. Basta una pequeña diferencia de señales, en la entrada, para que se obtenga una salida total en voltios ligeramente inferior a la tensión de alimentación. Como señal de entrada se utiliza la diferencia entre la variable y el punto de consigna y en el terminal de salida se conecta un circuito de excitación del relé final de control. La zona muerta del control todo-nada se logra mediante una resistencia conectada en serie con el terminal no inversor del amplificador y con una resistencia conectada entre este último terminal y el de salida del amplificador.

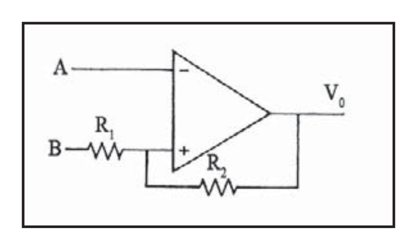


Figura 9.22 Esquema de un controlador electrónico todo-nada

Funciona del modo siguiente: cuando la señal en el terminal B aumenta unos pocos milivoltios con relación a la del terminal A, la salida V_0 aumenta y es realimentada vía la resistencia R_2 a la entrada del amplificador, bloqueándolo. El amplificador permanece en estas condiciones gracias al divisor de tensión que forman los terminales B y la salida.

Para que las condiciones iniciales se reestablezcan, la señal de entrada debe bajar los suficiente milivoltios, con relación al terminal inversor, para compensar el efecto del divisor de tensión R_1 R_2. El valor de la zona muerta depende de la relación R_2 / R_1 y será más pequeño cuanto mayor sea esta relación.

9.5.2 Control proporcional de tiempo variable

El *control electrónico proporcional de tiempo variable* (figura 9.23) deriva del todo-nada aplicando un circuito *RC* entre la salida y la entrada inversora, para conseguir, de este modo, un retardo en la realimentación inversora y hacer que el circuito entre en oscilación. El circuito funciona del modo siguiente: sea nula la tensión en A y negativa la tensión en B con respecto a A. Evidentemente, la señal de salida será negativa, con lo cual el condensador C_1 se cargará negativamente y el divisor de tensión R_a R_1 R_2 impedirá que el terminal inversor del amplificador operacional tenga menor tensión negativa que la entrada no inversora.

Si ahora la entrada B se hace positiva con relación a A, la señal de salida se hará positiva, cargando también positivamente el condensador C_1 en un tiempo que depende de los valores de R_2 y C_1. En el instante en que la carga positiva de C_1 es suficiente para compensar el divisor de tensión formado por R_a R_1, la entrada inversora se hace positiva, provocando el cambio de signo en la señal de salida, pasando ésta a negativa. A continuación, la carga del condensador se hace negativa y va aumentando hasta que sobrepasa la influencia del divisor de tensión R_a R_1, con lo cual la entrada inversora se hará negativa y, por lo tanto, la señal de salida cambiará ahora a positiva, y así sucesivamente.

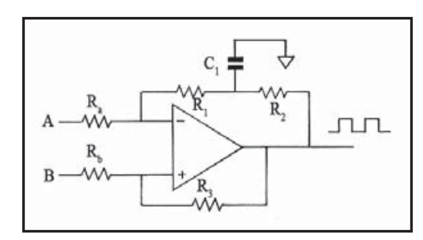


Figura 9.23 Control electrónico proporcional de tiempo variable

En la salida, estas oscilaciones tienen forma de onda cuadrada, de amplitud casi equivalente a la tensión de alimentación. Las variaciones de la tensión de entrada B cambiarán la tensión real media de carga del condensador C_1, lo que fijará la proporción entre el tiempo de conexión y el de desconexión del relé de salida. Es decir, si esta tensión media es de 0 V, los tiempos serán iguales y la relación valdrá 1/1. El sistema utilizará diferentes partes de la curva de carga/descarga del condensador variando la señal de entrada B. Por otro lado, la proporción entre el tiempo de conexión/desconexión del relé de salida vendrá fijada por el punto de trabajo del condensador C_1.

9.5.3 Control proporcional

En el *control electrónico proporcional*, el amplificador operacional se usa como amplificador analógico de ganancia finita, con lo que su alta ganancia da lugar a que la entrada tenga que ser muy débil, casi nula, del orden de 0,2 mV. Para disminuir esta elevada ganancia es necesario realimentar la señal de salida a la entrada inversora -V_e mediante una resistencia R_f, y como nos interesará que la señal de entrada tenga un valor distinto de cero, se añade al circuito otra resistencia R_a. En la figura 9.24 puede verse el esquema de conexionado.

Consideremos ahora que las señales de entrada y salida sean nulas; evidentemente no habrá circulación de corriente a través de las resistencias R_f y R_a. Si ahora la entrada inversora A cambia a + 1 V, la tensión de salida variará en la dirección -V_e hasta que la corriente de entrada del amplificador se reduzca a cero (ya que es un amplificador diferencial).

Esta condición se alcanza cuando:

$$\frac{V_{o(salida)}}{R_f} = \frac{V_{A(entrada)}}{R_a}$$

Y, de aquí, la ganancia del amplificador es:

$$\frac{V_o}{V_A} = \frac{R_f}{R_a}$$

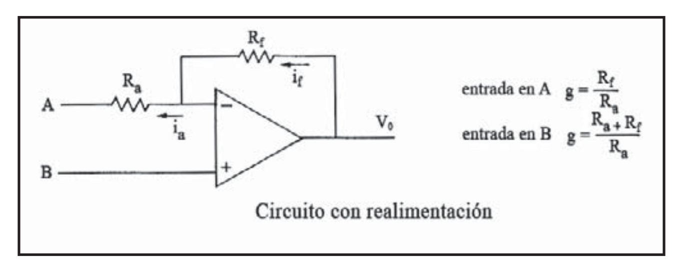


Figura 9.24 Esquema de un controlador electrónico P

9.5.4 Control proporcional + integral

En el *control electrónico proporcional + integral*, la acción integral puede generarse, en el amplificador operacional, mediante un condensador conectado en serie con la línea de realimentación negativa y con una resistencia conectada en serie con el terminal inversor. Siendo i_b una intensidad débil comparada con la intensidad de corriente i_i.

Se verificarán las ecuaciones siguientes:

$$V_0 = \frac{-\int i_i \, dt}{C_i}$$

$$PV - SP = i_i R_a$$

de donde:

$$V_0 = -\frac{1}{R_a C_i} \int_0^t (PV - SP)dt$$

que es la ecuación de la acción integral con constante de tiempo:

$$\tau_i = R_a \times C_i$$

El sistema de la figura 9.25a tiene el inconveniente de invertir la señal de salida con relación a la señal de error (PV - SP), lo cual es indeseable en algunas aplicaciones. Para evitarlo, puede conectarse la señal de error a la entrada no inversora, dejando el condensador de integral entre la salida y la entrada inversora, y conectando esta última a la línea de cero voltios a través de una resistencia (figura 9.25b).

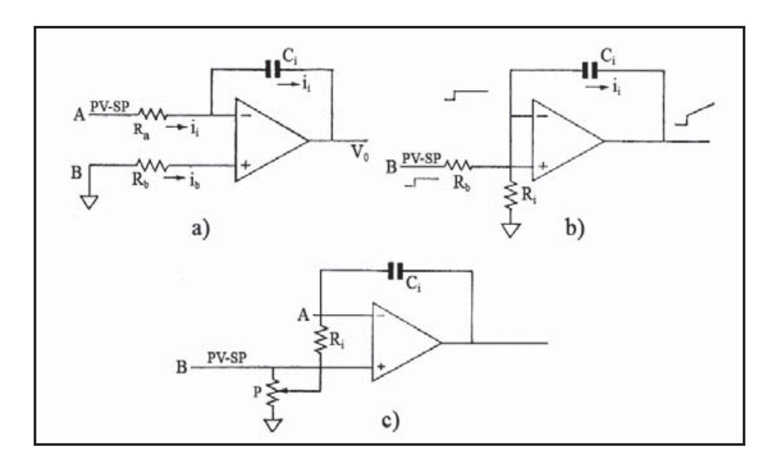


Figura 9.25 Control integral electrónico

Cuando se aplica una señal de error positiva PV - SP a la entrada no inversora B, la salida cambia en una dirección positiva, con lo cual el condensador C_1 se va cargando, pasando así una corriente i a través de la resistencia R_i, lo que provoca una variación de la carga del condensador. La disminución de tensión correspondiente creada en la entrada inversora del amplificador hace que la salida aumente en una dirección positiva, lo cual a su vez hace que el terminal negativo, a través del condensador C_i, pase a tener una tensión positiva, manteniendo la corriente i_i en la resistencia R_i y continuando indefinidamente esta cadena de acontecimientos, acción que recibe el nombre de *integración*.

Para un error PV - SP positivo, la señal de salida cambia en forma de rampa positiva. La velocidad de variación de la salida depende de los valores de C_i y R_i, así como del valor de la señal de error. La señal de error vista por el amplificador operacional puede variarse conectando la resistencia R_i al cursor de un potenciómetro conectado entre la entrada B de la señal de error y la línea de 0 voltios.

De este modo, se obtendrá un ajuste fino del tiempo de acción integral en el potenciómetro, y un ajuste más amplio cambiando los valores de la resistencia R_i. En la figura 9.25c puede verse el esquema correspondiente.

9.5.5 Control proporcional + derivado

La *acción derivada* puede conseguirse colocando un condensador C_d a la entrada inversora y una resistencia R_d en paralelo, entre la salida y la entrada inversora. Las ecuaciones correspondientes son:

$$V_0 = -i_d \times R_d$$

$$PV - SP = \frac{\int i_d dt}{C_d}$$

Derivando la segunda ecuación resulta:

$$\frac{d(PV - SP)}{dt} = \frac{1}{C_d} i_d$$

Y, sustituyendo en la primera, se tiene:

$$V_0 = -R_d C_d \frac{d(PV - SP)}{dt}$$

Que es la ecuación de la acción derivativa de constante de tiempo:

$$\tau_d = R_d \times C_d$$

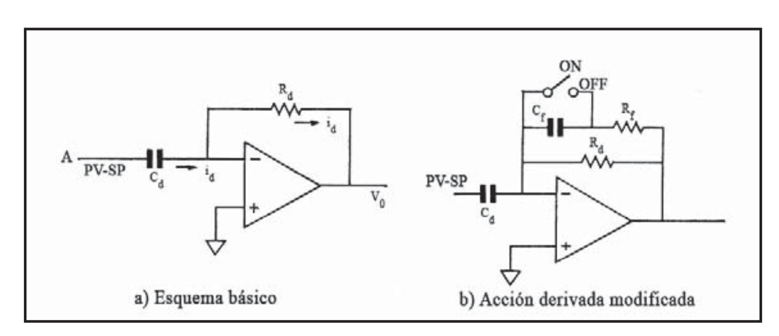


Figura 9.26 Controlador de acción derivada

El ajuste de la acción derivativa se obtiene transformando la resistencia R_d en un potenciómetro. Cuando la señal de error cambia rápidamente (debido a una variación rápida del punto de consigna o bien de la variable o quizá provocado por señales con ruido), la señal de salida aumenta muy rápidamente tomando la forma de un pico en el límite. Este efecto es indeseable ya que puede perjudicar el control del proceso. Este inconveniente se soluciona eliminando la acción derivativa cuando el instrumento capta una variación rápida de la señal de error. Se conecta un condensador C_1 y una resistencia R_1 en serie, en paralelo con la resistencia derivativa R_d. De este modo, como la impedancia de C_1 es inversamente proporcional a la variación de tensión que se le aplica, un cambio rápido de tensión hará que el condensador C_1 presente una baja impedancia a través de la resistencia derivativa R_d, con lo cual el tiempo de acción derivativa será necesariamente bajo, modificándose el valor derivativo ajustado sólo durante el instante de la variación rápida de la señal de error. Un interruptor conectado en paralelo con el condensador C_1 permite, en la posición de conexión, eliminar la acción derivativa cuando así se desee.

9.5.6 Control proporcional + integral + derivado

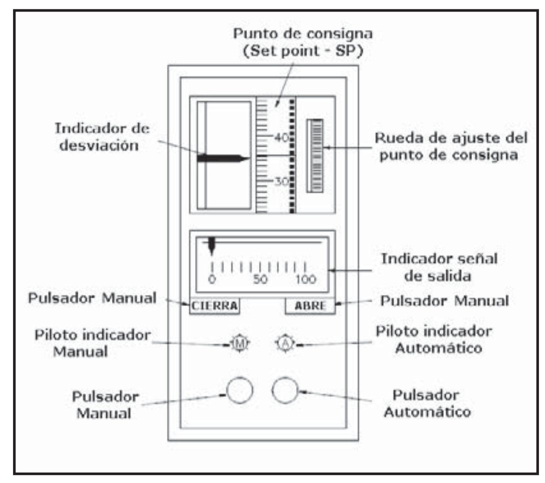
La unión en un circuito de los tres controladores descritos anteriormente da lugar a un instrumento electrónico *proporcional + integral + derivativo*.

El circuito simplificado consiste en un módulo proporcional + integral + derivativo, donde se fija la ganancia o banda proporcional, se amplifica la desviación entre la variable y el punto de consigna, se fija el valor del punto de consigna y se selecciona la acción directa o la inversa del controlador y un módulo de acción derivada modificada donde se encuentra el potenciómetro de acción derivada.

La ecuación correspondiente es:

$$V_0 = g(PV - SP) + K' \int_0^t (PV - SP)dt + K'' \frac{d(PV - SP)}{dt}$$

En otros controladores, el potenciómetro de acción proporcional se encuentra en la salida del segundo amplificador operacional. Los controladores electrónicos suelen disponer, además, de un conmutador automático-manual con un reóstato para control manual y un circuito de memoria para que el cambio automático a manual se efectúe sin saltos en la posición de la válvula de control.



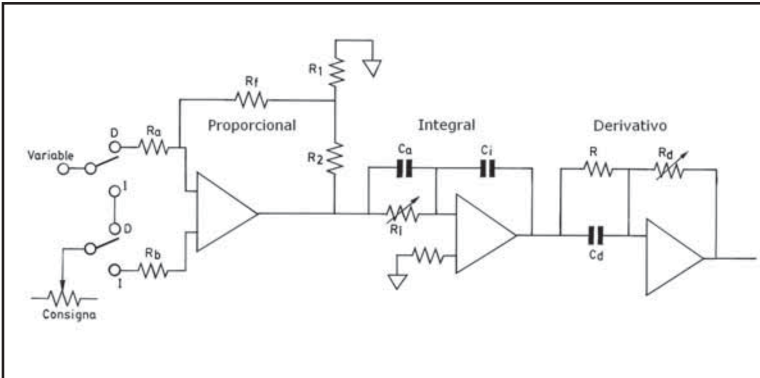


Figura 9.27 Controlador electrónico PID

Los instrumentos electrónicos de control de panel descritos son del tipo miniatura. Pueden incorporar un microprocesador, lo que les ha permitido la incorporación de "inteligencia" para permitir, por ejemplo, el ajuste del punto de consigna y de las acciones *PID* sin extraer el instrumento de su base en el panel, el autoajuste del instrumento (fijación de los valores de las acciones proporcional, integral y derivada) para acomodarse a las variaciones de régimen de carga del proceso, y el autodiagnóstico del aparato.

9.6 Controladores digitales

9.6.1 Componentes

El *controlador digital* contiene el procesador o microprocesador (*CPU = Central Process Unit*) y la memoria principal, comunicados entre sí y con los periféricos (teclado, monitor, unidad de discos,

ratón, impresora, plotter y modem) a través de los canales de señales o buses: el bus de datos, el bus de direcciones y el bus de control.

El *procesador* o *microprocesador* contiene:

La *unidad aritmética y lógica* (ALU) que efectúa las operaciones aritméticas básicas de suma y resta, y que dispone de los operadores lógicos de comparación AND, OR, NOT, XOR, etc.

La unidad de control constituye el verdadero "cerebro" del ordenador y busca e interpreta las instrucciones de un programa, coordinando el funcionamiento de la unidad aritmética y lógica mediante los pulsos de frecuencia del reloj del microprocesador, que determina el tiempo de ejecución de las tareas confiadas al ordenador. Un oscilador de cuarzo típico, tal como el incluido en el microprocesador Pentium M730 de INTEL, genera desde 900 MHz hasta 2,26 GHz.

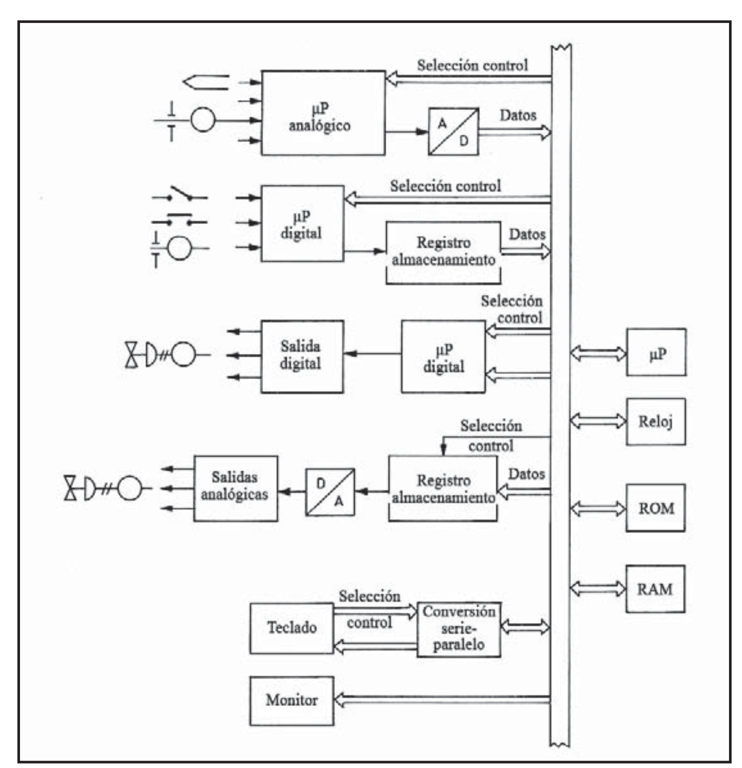


Figura 9.28 Controlador digital

El *bus de datos* transfiere datos o instrucciones de modo bidireccional entre el microprocesador y la memoria principal (ROM y RAM). El bus de datos puede disponer típicamente de 8, 16, 32, 64 o 128 canales, es decir, existen 8, 16, 32, 64, 128 o 256 conductores eléctricos en los circuitos impresos que transportan, simultáneamente, un idéntico número de impulsos eléctricos a través de las denominadas puertas paralelas (*parallel ports*), lo que permite un mayor manejo de datos tanto más cuanto mayor sea el número de conductores en paralelo. De aquí la denominación de ordenadores de 8, 16, 32, 64, 128 o 256 bits (un bit es el valor O o el valor 1, es decir representa el paso o no de un impulso eléctrico a través de cada conductor del bus), capaces de manejar a la vez 1, 2, 4, 8, 16 o 32 bytes (1 byte = 8 bits).

El *bus de direcciones* parte del microprocesador indicando a la memoria principal la dirección exacta de la memoria donde están almacenados los datos.

El *bus de control* se encarga de transportar las señales de control que activan los componentes del ordenador en el momento adecuado, como si fueran estímulos nerviosos provocados y de corta duración.

La *memoria principal* del ordenador almacena los datos, instrucciones y resultados obtenidos en grupos de 8 bits, denominándose a cada grupo posición de memoria o byte que corresponde a 1 carácter, es decir, a una letra, número, símbolo o espacio. Cada 1024 caracteres constituyen un kilobyte y 1000 kilobytes forman un megabyte. Para representar valores más altos que el byte, pueden asociarse dos bytes formando lo que se denomina palabra (*word*).

Fundamentalmente hay dos tipos de memoria:

> *ROM* (*Read Only Memory*) o *memoria de sólo lectura*, que no puede ser modificada y no se borra al desconectar el ordenador, donde se guarda el sistema operativo (por ejemplo, el Windows de Microsoft) que proporciona la interfaz entre el ordenador y el exterior (le dice al ordenador lo que tiene que hacer).
>
> *RAM* (*Random Access Memory*) o *memoria de acceso aleatorio* que almacena los programas. Estos programas constituyen una especie de "memoria aprendida" o *software*, mientras que la estructura física del ordenador que soporta la información recibe el nombre de *hardware* y es "todo lo que puede verse y tocarse", incluyéndose los periféricos. La RAM es "volátil", es decir, se borra al desconectar el ordenador.

Los periféricos se encargan de relacionar las señales digitales con el mundo exterior (pantalla, teclado, módems, unidades de discos, etc.).

Existen controladores digitales individuales, en particular para procesos discontinuos (*batch*), que llevan a cabo un control multifunción, actúan como instrumentos reguladores (para variables como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura, etc.) con control lógico y control secuencial, efectúan operaciones aritméticas, monitorizan entradas y salidas, y tienen capacidad gráfica con representación del balance de materias. Este tipo de controladores permiten la creación de software para definir todos los enclavamientos y secuencias de la operación.

Los controladores digitales, al estar dotados de microprocesador, realizan directamente las funciones de control auxiliar expuestas antes en los instrumentos neumáticos y electrónicos, y no precisan de ningún otro instrumento.

El *software* son las instrucciones y programas que permiten la utilización eficaz del ordenador.

El *hardware* son los dispositivos físicos que conforman el computador y los periféricos.

El *firmware* son los circuitos que contienen programas inalterables (ROM, EPROM).

9.6.2 Algoritmos

Los controladores digitales permiten el ajuste de sus acciones de control ante las perturbaciones periódicas del proceso. Por este motivo pueden trabajar con varios algoritmos de control $P + I + D$. El algoritmo convencional, con los bloques en serie donde las acciones se influyen mutuamente, y que corresponde a los controladores clásicos neumáticos y electrónicos, es:

$$Señal\ de\ salida = Kc \times \left[e(t) + \frac{1}{TI} \times \int e(t) \times dt \right] \times \left[1 + TD \times \frac{de(t)}{dt} \right]$$

Este algoritmo fue el primero que se instaló debido a que ahorraba amplificadores, que eran caros en aquel tiempo. La equivalencia de las acciones, con relación al algoritmo ideal, es:

$$BP\ (efectiva) = \frac{BP}{1 + \frac{TD}{TI}}$$

$$TI\ (efectiva) = TI + TD$$

$$TD\ (efectiva) = \frac{1}{\frac{1}{TI} + \frac{1}{TD}}$$

El algoritmo, con los bloques en paralelo, tiene por expresión:

$$Señal\ de\ salida = Kp \times e(t) + \frac{1}{TI} \times \int e(t) \times dt + TD \times \frac{de(t)}{dt}$$

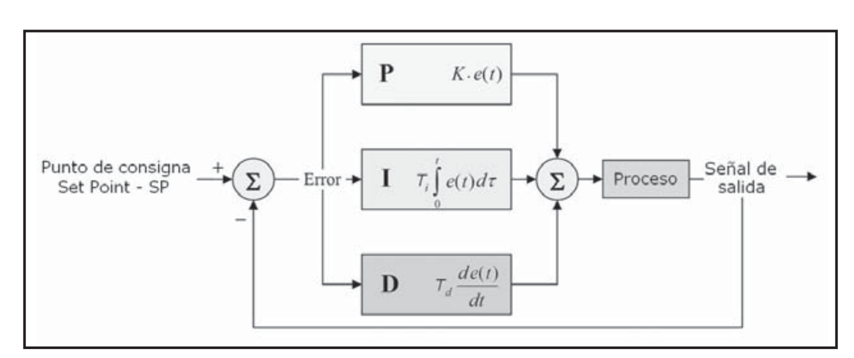


Figura 9.29 Diagrama de bloques en paralelo del controlador PID

La equivalencia de las acciones, con relación al algoritmo ideal, es:

$$Kc = Kp$$

$$TI\ (efectiva) = TI \times Kp$$

$$TD\ (efectiva) = \frac{TD}{Kp}$$

El algoritmo ideal es:

$$Señal\ de\ salida = Kc \times \left[e(t) + \frac{1}{TI} \times \int e(t) \times dt + TD \times \frac{de(t)}{dt} \right]$$

siendo :

e = error o diferencia entre la variable y el punto de consigna

Kc, Kp = ganancia del controlador (100/banda proporcional)

TI = tiempo de acción integral en minutos/repetición

TD = tiempo de acción derivativa en minutos de anticipo

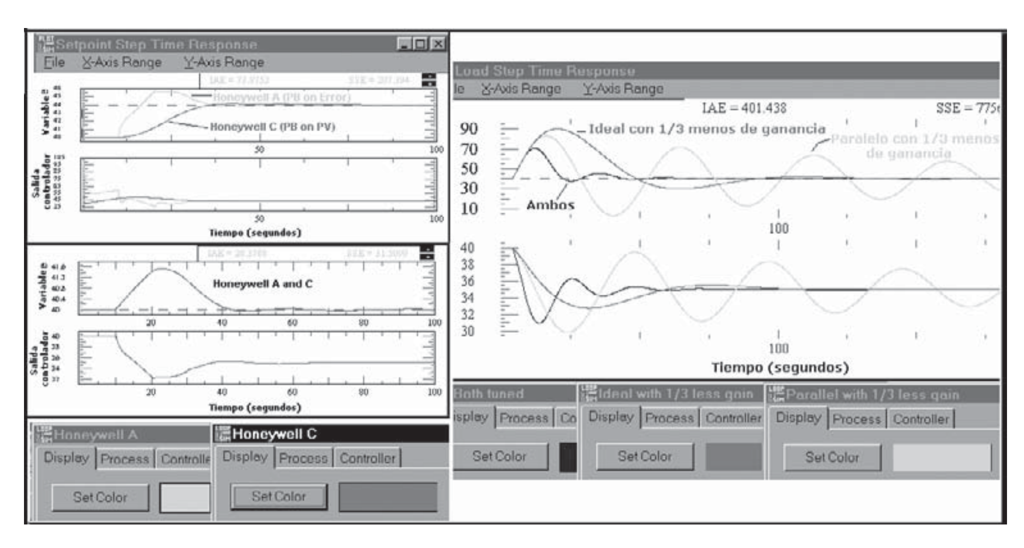


Figura 9.30 *Diferentes comportamientos de los algoritmos de control. Fuente: ExperTune*

Es evidente que estos algoritmos, si bien disponen de las tres acciones *PID*, tienen comportamientos diferentes. En ocasiones, la sustitución de controladores antiguos por otros nuevos en los que se fijaron los mismos valores ajustados de las acciones de control, comportó la inestabilidad de los lazos, debido a que los algoritmos de los nuevos diferían de los antiguos.

Algunos algoritmos de control permiten seleccionar que la ganancia actúe sobre los cambios del punto de consigna (Tipo A de Honeywell o Bailey SP) o bien sobre la variable (Tipo C de Honeywell o Bailey PV).

Con relación a la acción derivativa, los fabricantes usan diferentes métodos de filtrar la variable, de sensibilizar o no la acción derivativa con los cambios en el punto de consigna y de interaccionar o no con la acción integral. De aquí, que este es uno de los motivos de los usuarios para no usar o emplear con precaución la acción derivativa.

En un controlador digital es necesario discretizar los valores de sus acciones. De este modo, y siendo:

T_m = período de muestreo, es decir $T_m = t_k - t_{k-1}$

$e(t_k)$ = error o diferencia entre la variable y el punto de consigna

$e(t_{k-1})$ = error un incremento de tiempo de muestreo antes

$e(t_{k-2})$ = error dos incrementos de tiempo de muestreo antes

resulta:

$$Y(t_k) = k\left\{ e(t_k) + \frac{T_m}{T_i} \times e(t_k) - e(T_{k-1}) + \frac{T_d}{T_m}\left[e(t_k) - 2e(t_{k-1}) + e(t_{k-2}) \right] \right\}$$

siendo:

k = ganancia de la acción proporcional

T_i = min/repetición de la acción integral

T_d = minutos de la acción derivativa

Los controladores digitales, por su propia constitución, son configurables a través del teclado, pudiendo realizarse, en general, las siguientes selecciones:

- Filtrado digital de la señal de entrada.
- Presentación de la variable en unidades seleccionables (por ejemplo, m^3/h, °C, etc.).
- Selección del tipo de control todo-nada, *P*, *PI*, *PD*, *PID* y de otros algoritmos.
- Selección de acción directa (al aumentar la variable aumenta la señal de salida) o acción inversa (al aumentar la variable disminuye la señal de salida).
- Límite en la acumulación de la acción integral en procesos discontinuos.
- Corrección de emisividad en la medición de temperatura por pirómetro de radiación.
- Seguimiento del punto de consigna.
- Autoajuste de las acciones de control.
- Seguridad contra manejo no autorizado.
- Autodiagnóstico.

Como ilustración se adjuntan las funciones principales del lazo de control de un programa de simulación de un controlador *PID* de regulación de temperatura:

```
FUNCIONES LAZO DE CONTROL (P=D/DT)
CONTROLADOR-DEF FNC(P)=K(1+(1/(R*P)+TD*P)
VALVULA-DEF FNV(P)=1/((C2*P)^2+2*S*C2*P+1)
PROCESO-DEF FNP(P)=(D1*(T1-T2)/Q2*D2))/(1+((V/Q2)*P))
RETARDO-EL PRODUCTO TARDA C3 MIN. EN ALCANZAR EL TERMOPAR
TERMOPAR-DEF FNT(P)=1/(1+T3*P)
```

Este tipo de programas permiten cambiar los datos del proceso y de los instrumentos para ejercitarse en la comprensión práctica del comportamiento de los lazos de control.

9.6.3 Controlador digital universal

Dentro de la evolución del controlador clásico *PID* figura el *controlador digital universal* que es capaz de controlar individualmente una unidad de operación de la planta (figura 9.31). Por ejemplo, el control de un reactor o el control de un horno, o el de un compresor. En este sentido, el controlador debe manipular una serie de entradas y de salidas, y debe efectuar varias operaciones y cálculos de control para los lazos de la unidad de proceso, aparte de proporcionar las secuencias de enclavamientos de bombas y de válvulas todo-nada del proceso. Como estas operaciones deben poder realizarse para diferentes tipos de unidades de proceso, se sigue que el controlador universal está formado por ordenadores especiales con el adecuado hardware, bien estudiado por el suministrador, para que el usuario no tenga especiales dificultades al programar el software necesario en su proceso. El suministrador proporciona al usuario librerías de subrutinas de funciones de control *PID* y lógico.



Figura 9.31 Controlador universal. Fuente: Honeywell

La creciente utilización del *ordenador personal* pone como atrayente la solución competitiva y económica de utilizar un ordenador personal para el control de las variables del proceso. Por contra, esta solución presenta como desventaja el hecho de que el ordenador personal está preparado para trabajar en el ambiente de oficina o de laboratorio, pero no para el ambiente industrial con polvo, vibraciones y altas o bajas temperaturas. Por otro lado, la constante modernización de los sistemas operativos ha hecho del ordenador personal una herramienta indispensable para el control de procesos. La rápida evolución de las placas y tarjetas de adquisición de datos y de entrada/salida, así como la facilidad de programación de éstas y el desarrollo de nuevos softwares, permiten el control del proceso en tiempo real de una manera mucho más efectiva que la de pocos años atrás.

Entre los paquetes de software que pueden emplearse figura el *Labview* que permite el control en tiempo real del proceso y, además, el uso compartido del ordenador personal para otros menesteres como, por ejemplo, trabajar con un procesador de textos o con una hoja electrónica.

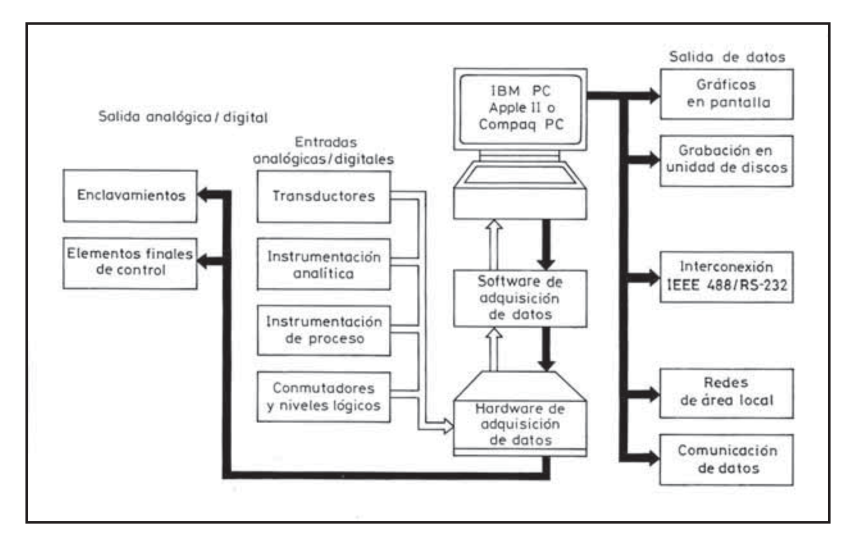


Figura 9.32 Ordenador personal para el control de procesos

Diversos fabricantes tienen en el mercado ordenadores que subsanan el gran problema de los ordenadores personales: su poca fiabilidad para trabajar en ambientes industriales. Estos ordenadores son más robustos que sus homólogos aunque su desarrollo está en una generación anterior a la de los ordenadores personales.

9.7 Selección del sistema de control

Las tres acciones combinadas *PID* actúan sobre el elemento final de control en la forma señalada en la figura 9.33.

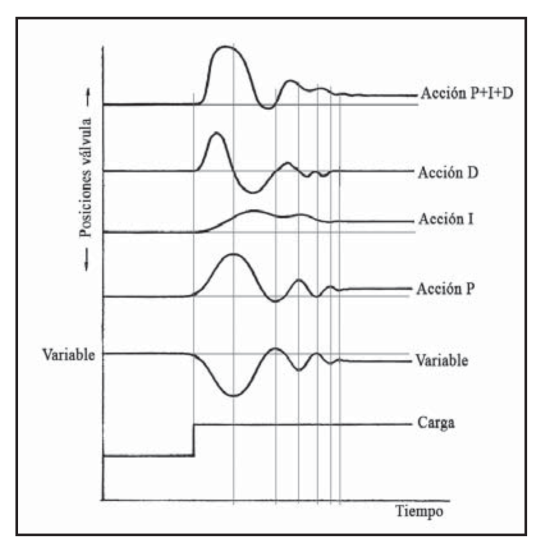


Figura 9.33 *Acciones PID*

Sus características esenciales ya estudiadas pueden resumirse así:

1. La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna.
2. La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna.
3. La acción derivada corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada.

Considerando estos puntos, la selección del sistema de control es, usualmente, un compromiso entre la calidad del control que se desea y el coste del sistema de control. Es decir, debe ser suficiente para satisfacer la tolerancia requerida en el proceso, pero no debe incluir excesivos refinamientos que lo encarezcan. Sin embargo, económicamente hay muy poca diferencia entre un controlador *PI* y uno *PID*, de modo que en el caso de estudiar procesos y sus perturbaciones que no sean bien conocidos puede ser más barato adquirir el controlador *PID* para tener así un potencial de mayor flexibilidad en el control del proceso. No obstante, los instrumentos de tipo modular admiten fácilmente la adición de una o varias acciones. Los controladores digitales incorporan las tres acciones, de modo que la elección es técnica, para que el proceso esté bien controlado, y no económica, y se efectúa en el proyecto y en la puesta en marcha.

La tabla 9.1 es una guía general para seleccionar un sistema de control y debe consultarse, únicamente, como guía de aproximación al control idóneo.

Lazo de control	Capacitancia del proceso	Resistencia del proceso	Cambio de carga del proceso	Aplicaciones
Todo-nada	Grande	Cualquiera	Cualquiera	Control de nivel y temperatura en procesos de gran capacidad
Flotante	Media	Cualquiera	Cualquiera	Procesos con pequeños tiempos de retardo
Proporcional	Pequeña a media	Pequeña	Moderada	Presión, temperatura y nivel donde el offset no es inconveniente
Proporcional + Integral	Cualquiera	Pequeña	Cualquiera	La mayor parte de aplicaciones, incluyendo el caudal
Proporcional + Derivado	Media	Pequeña	Cualquiera	Cuando es necesaria una gran estabilidad con un offset mínimo y sin necesidad de acción integral
Proporcional + Integral + Derivada	Cualquiera	Grande	Rápido	Procesos con cambios rápidos y retardos apreciables (control de temperatura en intercambiador de calor)

Tabla 9.1 *Guía de selección de sistemas de control*

9.8 Criterios de estabilidad en el control

La estabilidad en el control es la característica del lazo de control (proceso + transmisor + controlador + válvula de control), que hace que la variable vuelva al punto de consigna después de una perturbación. Los criterios deseables para la estabilidad se representan en la figura 9.34 y son los siguientes:

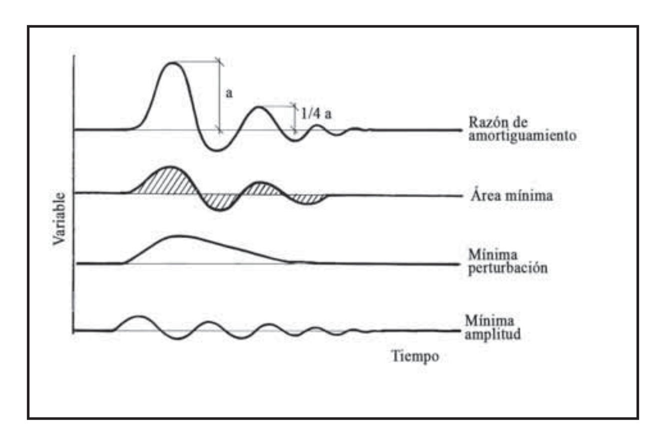


Figura 9.34 Criterios de estabilidad

El *criterio de estabilidad* más utilizado para ajustar las acciones de control al proceso es el de r*azón de amortiguamiento 1/4*, en el que después de una perturbación la variable se estabiliza cuando las relaciones entre las amplitudes de las crestas de recuperación sucesivas son de 4 a 1. Este criterio es un compromiso entre la estabilidad de la respuesta del controlador y la rapidez del retorno de la variable a un valor estable: una relación mayor de 1/4 dará mayor estabilidad pero prolongará el tiempo de normalización de la variable, facilitando la aparición anticipada de perturbaciones, mientras que una relación menor de 1/4 devolverá la variable más rápidamente al punto de consigna o a un valor estable, pero perjudicará la estabilidad del sistema.

El *criterio de área mínima*, o *criterio de la integral mínima del valor absoluto del error (IAE)*, indica que el área de la curva de recuperación debe ser mínima, para lograr que la desviación sea mínima en el tiempo más corto.

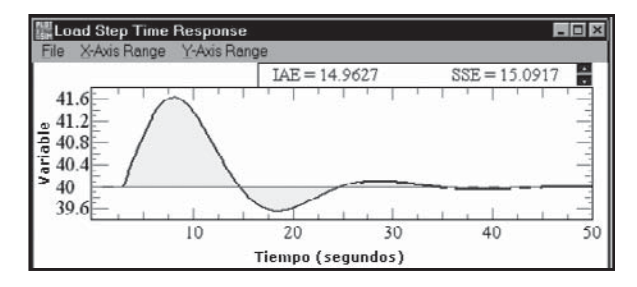


Figura 9.35 Criterio de área mínima (IAE). Fuente: ExperTune

Es decir, la expresión:

$$\int_0^t |e|\, dt$$

en la que $|e|$ es el valor absoluto de la desviación, debe tener el valor mínimo.

El *criterio de mínima integral del cuadrado del error (ISE)*, establece que debe ser mínima la expresión:

$$\int_0^t [e(t)]^2 dt$$

que penaliza los grandes errores [$e(t)$ está elevado al cuadrado], con lo cual las respuestas son poco amortiguadas.

El *criterio de mínima integral en el tiempo del valor absoluto del error (ITAE)*, indica que debe ser mínima la expresión:

$$\int_0^t [e(t)]\, t \times dt$$

penaliza los pequeños errores que se presentan al final de la curva de recuperación, con lo cual, las respuestas son altamente amortiguadas.

En general, estos criterios están restringidos a tiempos de retardo pequeños y medios que cumplen la condición:

$$0 < \frac{Tiempo\ de\ retardo\ del\ proceso}{Constante\ de\ tiempo\ del\ proceso} \leq 1$$

Criterio de mínima perturbación que requiere una curva de recuperaciones no cíclicas y se aplica cuando, por ejemplo, las correcciones rápidas o cíclicas de una válvula de control de vapor pueden perturbar, seriamente, las presiones de vapor de alimentación e influir en otros procesos alimentados por la misma fuente. Otro caso puede ser el control en cascada en que la señal de salida de un controlador varíe cíclicamente y se aplique como punto de consigna en un segundo controlador, creándole serias variaciones de carga.

Criterio de amplitud mínima. De acuerdo con este criterio, la amplitud de la desviación debe ser mínima, lo cual se aplica, especialmente, a procesos en que el producto o el equipo puede ser dañado por desviaciones momentáneas excesivas y, en este caso, la magnitud de la desviación es más importante que su duración. Por ejemplo, en el caso de fusión de algunas aleaciones metálicas, el sobrepasar temporalmente una determinada temperatura puede destruir el metal. Se aplica este criterio también en el caso de procesos exotérmicos con el punto de consigna próximo a la temperatura de disparo de la reacción exotérmica incontrolable.

Cuando se pone en marcha una planta tiene lugar, normalmente, un primer ajuste de los controladores, es decir, la fijación de los valores de las acciones *PID*. Dado que, en la puesta en marcha, el tiempo es limitado, los instrumentistas, según su experiencia, prefijan dichos valores y, más adelante, los ajustan definitivamente. Como guía de aplicación de valores iniciales figura la siguiente tabla.

Lazo de control	Ganancia	Banda proporcional %	Integral (minutos/repetición)	Integral (repeticiones/minuto)	Derivada (minutos)	Tipo de válvula de control
Presión (líquidos)	0,2 - 2	500 - 50	0,005 - 0,05	20 - 200	-	Lineal o isoporcentual
Presión (gases)	2 - 100	50 - 1	0,1 - 50	0,02 - 10	0,02 - 0,1	Lineal
Caudal	2 - 0,2	50 - 500	0,005 - 0,05	20 - 200	-	Lineal o isoporcentual
Nivel	2 - 100	50 - 1	1 - 100	0,01 - 1	0,01 - 0,05	Lineal o isoporcentual
Temperatura	50 - 1	2 - 100	0,2 - 50	0,02 - 5	0,1 - 20	Isoporcentual

Tabla 9.2 Valores de las acciones de control

9.9 Métodos de ajuste de controladores

Existen varios sistemas para ajustar los controladores al proceso, es decir, para que la ganancia (banda proporcional), el tiempo de acción integral (minutos/repetición) y el tiempo de acción derivada (minutos de anticipo) del controlador, caso de que actúen las tres acciones, se acoplen adecuadamente con el resto de los elementos del bucle de control (proceso + transmisor + válvula de control).

Este acoplamiento debe ser tal que, ante una perturbación, se obtenga una curva de recuperación que satisfaga cualquiera de los criterios mencionados para que el control sea estable, en particular, el de área mínima con una relación de amortiguación de 0,25 entre crestas sucesivas de la onda.

Para que este acoplamiento entre el controlador y el proceso sea posible es necesario un conocimiento inicial de las características estáticas y dinámicas del sistema controlado. Existen dos métodos fundamentales para determinar estas características, el método analítico y el experimental.

El *método analítico* se basa en determinar el modelo o ecuación relativa a la dinámica del sistema, es decir, su evolución en función del tiempo. Este método es, generalmente, difícil de aplicar por la complejidad de los procesos industriales y se incorpora a los controladores digitales que disponen de la potencia de cálculo adecuada en la determinación de la identificación del proceso y de los parámetros del modelo.

Uno de los programas que se utiliza es el *Plant Triage* de ExperTune, que analiza en detalle un conjunto de plantas desde el punto de vista de la instrumentación, los controladores y el equipo y optimiza los lazos de control para mejorar los procesos.

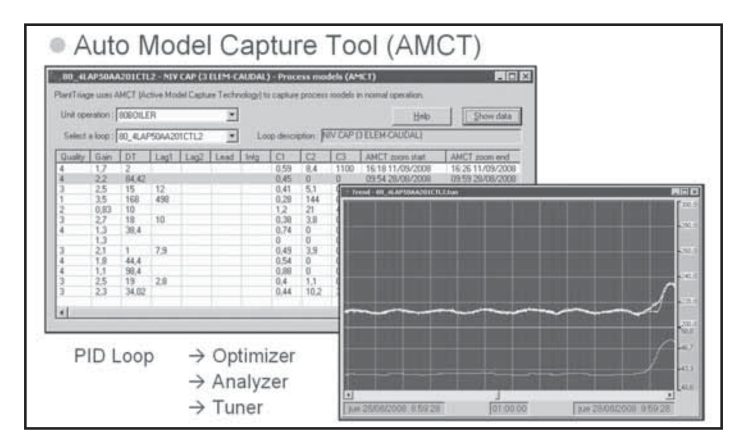


Figura 9.36 *Método analítico Plant Triage. Fuente: Iberdrola Aniorte - ExperTune - Google*

En esencia:

- Detecta las oscilaciones de las variables y emite un diagnóstico.
- Detecta las oscilaciones comunes en el mismo periodo de los lazos de control.
- Modeliza los procesos en base a la evolución de los procesos reales.
- Realiza cálculos y tendencias estadísticas de las variables de la planta.

En el *método experimental*, las características estáticas y dinámicas del proceso se obtienen a partir de una medida o de una serie de medidas realizadas en el proceso real. Estas respuestas del proceso pueden efectuarse de las siguientes formas:

1. Método de tanteo (lazo cerrado).
2. Método de ganancia límite (lazo cerrado).
3. Método de curva de reacción (lazo abierto).
4. Métodos de Chindambara y el de Kraus y Myron.

Hay una búsqueda constante de nuevos métodos gracias al uso del ordenador, que permite el análisis del proceso y el ensayo, en tiempo real o simulado, de los valores de las acciones de control.

Método de tanteo

El *método de tanteo* requiere que el controlador y el proceso estén instalados completamente y trabajando en su forma normal. El procedimiento general se basa en poner en marcha el proceso con bandas anchas en todas las acciones y estrecharlas, poco a poco individualmente, hasta obtener la estabilidad deseada.

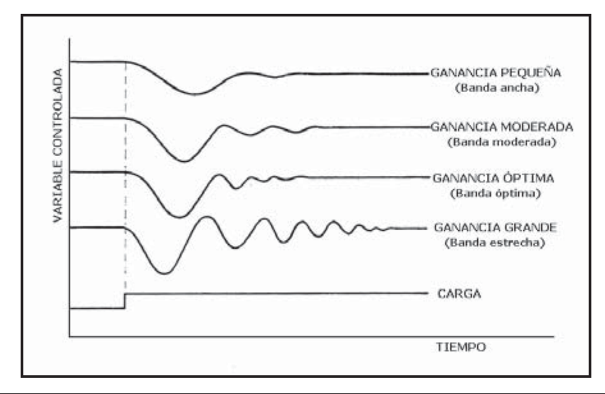
Para provocar cambios de carga en el proceso, y observar sus reacciones, se mueve el punto de consigna arriba y abajo en ambas direcciones, lo suficiente para lograr una perturbación considerable, pero no demasiado grande que pueda dañar el producto, perjudicar la marcha de la planta o bien crear perturbaciones intolerables en los procesos asociados.

En el caso de los instrumentos clásicos neumáticos y electrónicos, esta labor de ajuste se realiza en los controladores, extrayéndolos de sus cajas, fijando el valor correspondiente de la acción escogida e introduciéndolos, de nuevo, en sus alojamientos. En cuanto a los controladores digitales, el ajuste

se realiza simplemente llamando, a través del teclado, al lazo correspondiente, tecleando el valor de cada acción y pulsando la tecla de entrada.

Es necesario que pase un tiempo suficiente después de cada desplazamiento del punto de consigna, para observar el efecto total del último ajuste obteniendo algunos ciclos de la respuesta ante la perturbación creada. En procesos muy lentos, ello puede requerir hasta 2 o 3 horas.

Para ajustar los controladores proporcionales se empieza con una ganancia pequeña (banda proporcional ancha) y se aumenta, gradualmente, observando el comportamiento del sistema hasta obtener la estabilidad deseada. Hay que hacer notar que, al aumentar la ganancia (estrechar la banda proporcional), aumenta la inestabilidad y que, al disminuirla (ampliar la banda proporcional), se incrementa el error de *offset*, tal como se ve en la figura 9.37.



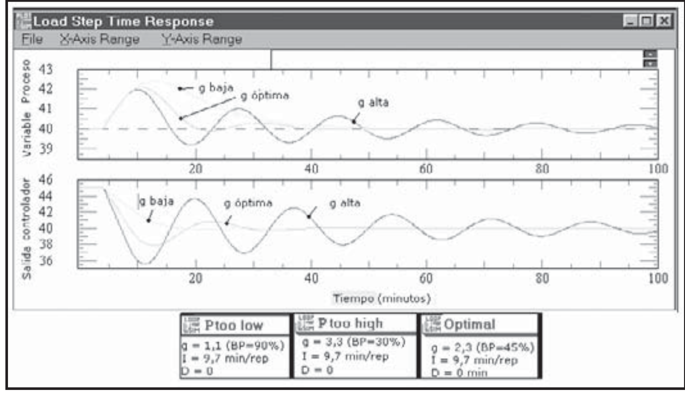
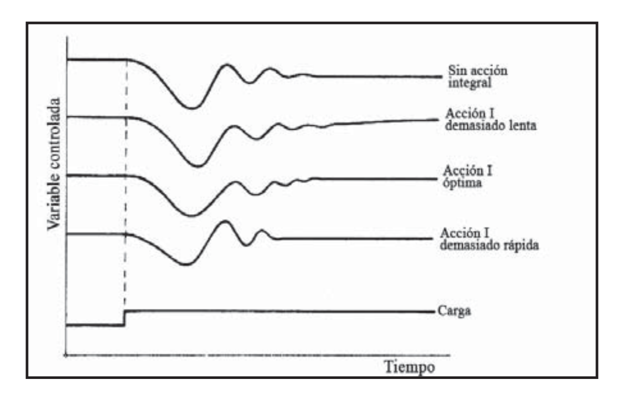


Figura 9.37 Ajuste banda proporcional. Fuente: ExpertTune

Para ajustar los controladores con banda *P + I*, se procede del siguiente modo:

Con la banda integral en ∞ minutos/repetición (o en 0 repeticiones/minuto), o en su valor más bajo, se sigue el procedimiento descrito anteriormente para obtener el ajuste de la ganancia proporcional hasta una relación de amortiguamiento aproximada de 0,25. Como la acción integral empeora el control y, al poseerla el instrumento, su ganancia debe ser un poco menor (banda proporcional un poco más alta), se disminuye ligeramente la ganancia (se aumenta ligeramente la banda proporcional) y, a continuación, se incrementa por pasos la banda integral, creando al mismo tiempo perturbaciones en forma de desplazamientos del punto de consigna, hasta que empiecen a aumentar los ciclos.

La última ganancia ensayada se aumenta ligeramente (se reduce ligeramente la última banda proporcional). En la figura 9.38 pueden verse unas curvas características de recuperación.



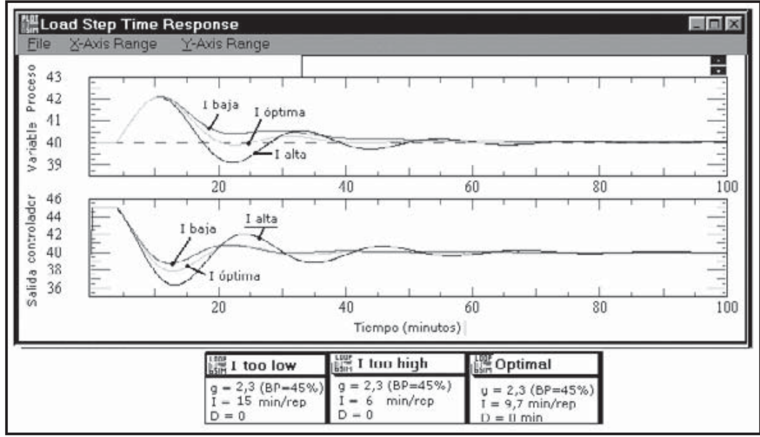


Figura 9.38 *Ajuste de la acción integral. Fuente: ExpertTune*

Un controlador *PI* bien ajustado lleva la variable al punto de consigna rápidamente y con pocos ciclos, sin que éstos rebasen o bajen del punto de consigna según haya sido el signo de la perturbación.

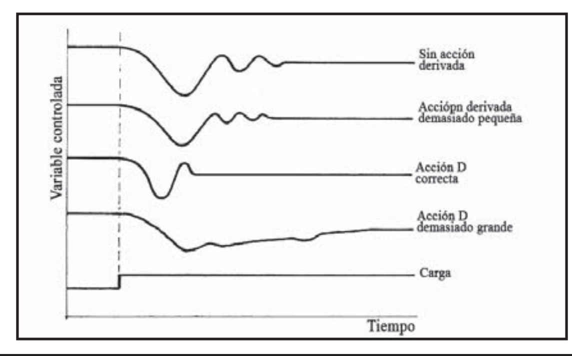
Al ajustar los controladores *P + I + D* se procede del siguiente modo:

Con la banda derivada en 0 y la integral en ∞ minutos/repetición, se aumenta la ganancia proporcional (se estrecha la banda proporcional) hasta obtener una relación de amortiguamiento de 0,25.

Se aumenta, lentamente, la banda integral en la forma indicada anteriormente hasta acercarse al punto de inestabilidad.

Se aumenta la banda derivativa en pequeños incrementos, creando, al mismo tiempo, desplazamientos del punto de consigna hasta obtener en el proceso un comportamiento cíclico, reduciendo ligeramente la última banda derivada (figura 9.39).

Después de estos ajustes, puede aumentarse normalmente la ganancia proporcional (disminuir la banda proporcional) con mejores resultados en el control.



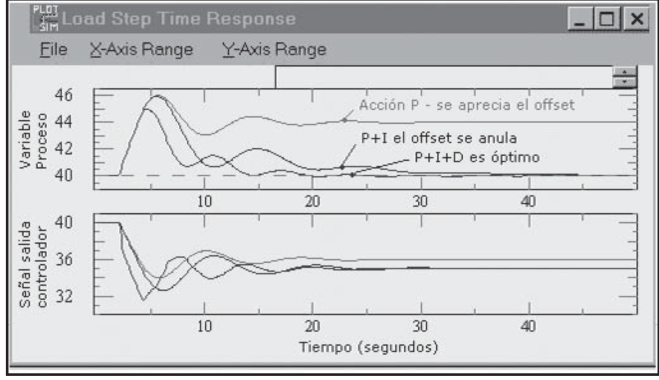


Figura 9.39 *Ajuste final acción derivada. Fuente: ExperTune*

Hay que señalar que una acción derivada óptima, después de una perturbación, lleva la variable a la estabilización en muy pocos ciclos.

En otra forma de ajuste, para obtener una óptima banda derivada se trabaja primero con una ganancia proporcional que da lugar a una ligera oscilación (varios ciclos) ante una perturbación, con la acción integral reducida al mínimo. Se aumenta, a continuación, la acción derivada hasta eliminar el ciclo de la acción proporcional. Se aumenta de nuevo la ganancia (se estrecha la banda proporcional) hasta que los ciclos se inician, y se aumenta todavía más la banda derivada hasta eliminarlos, continuando con estos pasos hasta que el aumento de la acción derivada no mejore la eliminación de los ciclos producidos. Finalmente, se ajusta la acción integral en la forma descrita anteriormente para eliminar el *offset*.

Un método de tanteo perfeccionado (basado en el método de ganancia límite que se explica más adelante) es el siguiente:

Inicialmente se ajusta el tiempo de acción integral al máximo, la acción derivada a cero y la ganancia al máximo (banda proporcional al mínimo). Se lleva el punto de consigna al valor deseado y, si el proceso no oscila, se va aumentando la ganancia al doble de su valor (bajando la banda proporcional a la mitad). Si el proceso oscila, se disminuye lentamente el ajuste de la ganancia (se aumenta la banda proporcional) en pequeños incrementos hasta obtener una oscilación mantenida. A continuación, se fija la ganancia en la mitad de su último valor (banda proporcional en el doble de su valor último). Se aumenta la acción derivada en un pequeño incremento y se cambia el punto de consigna, observando la respuesta del proceso. La respuesta deseada es un compromiso entre el rebasamiento del punto

de consigna y la velocidad a la cual el proceso lo alcanza, y la misma se reconoce porque disminuye el número de oscilaciones con respecto al control proporcional anterior. Se disminuye lentamente el tiempo de la acción integral en pequeños incrementos hasta observar una oscilación y, a continuación, se dobla este tiempo (o se divide el número de repeticiones/minuto por 2).

Si los ajustes efectuados en las acciones de control, son excesivos, pueden obtenerse las oscilaciones:

- Oscilación proporcional.
- Oscilación integral.
- Oscilación derivada.

Para distinguirlas, se observan las siguientes reglas:

a) La oscilación integral tiene un período relativamente largo.
b) La oscilación proporcional tiene un período relativamente moderado.
c) La oscilación derivada tiene un período muy largo y la variable tarda bastante tiempo en estabilizarse.

En la figura 9.40 pueden verse algunas de las curvas obtenidas con el método de tanteo.

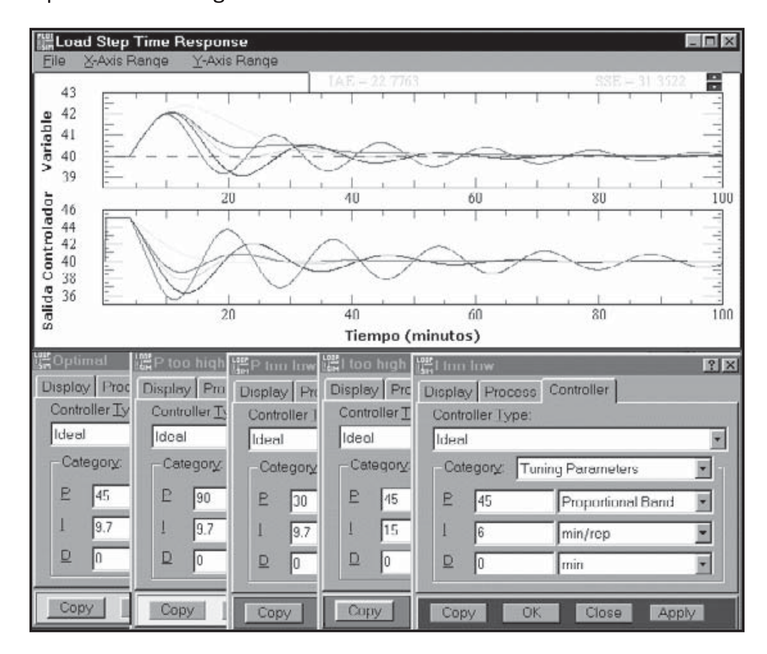


Figura 9.40 *Curvas finales obtenidas con el método de tanteo. Fuente: ExperTume*

También pueden emplearse otros criterios de ajuste basados en la respuesta del lazo de control (abierto o cerrado) a las entradas en escalón, o a las propias perturbaciones del proceso. Incluyen el tiempo de subida (tiempo requerido para que la respuesta a una entrada en escalón alcance del 10% al 90% del valor final), el tiempo de pico (tiempo que transcurre desde que la variable cruza el valor final hasta que alcanza su primer valor máximo o pico), el tiempo de restablecimiento (tiempo requerido para que la respuesta alcance y se mantenga dentro del 10% al 90% del valor final), la relación de amortiguación o razón de amortiguamiento entre picos de la variable de proceso.

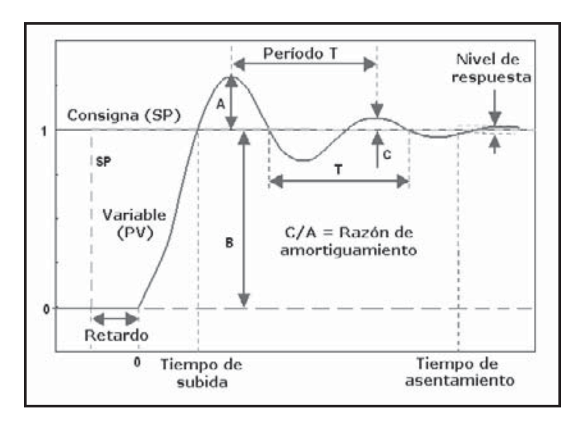


Figura 9.41 Respuesta del lazo de control ante una entrada en escalón de la variable

Método de ganancia límite

Este método de lazo cerrado fue desarrollado por Ziegler y Nichols, en 1940, y permite calcular los tres términos de ajuste del controlador a partir de los datos obtenidos en una prueba rápida de características del lazo cerrado de control. El método supone que el proceso es de primer orden y se basa en aumentar gradualmente la ganancia (o estrechar gradualmente la banda proporcional) con los ajustes de integral y derivada en su valor más bajo (integral = infinito número de minutos/repetición o cero repeticiones/minuto y derivada = 0 minutos de anticipo), mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empieza a oscilar de modo continuo (figura 9.42).

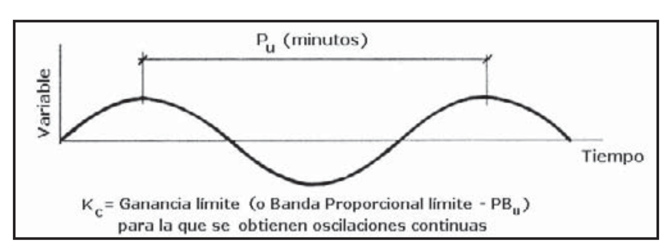


Figura 9.42 Oscilación mantenida (sensibilidad límite)

Esta ganancia proporcional se denomina *ganancia límite* (o *banda proporcional límite =* PB_u *= Proportional Band Ultimate*). Se anota el período del ciclo de las oscilaciones P_u en minutos, y la última ganancia límite K_c (o la última banda proporcional PB_u).

Los ajustes de control que producirán, aproximadamente, una respuesta con una relación de amplitudes 0,25, se calculan como sigue:

- *Controlador proporcional:*

  Ganancia = 0,5 K_c × Banda proporcional (%) = 2 PB_u

- *Controlador proporcional + integral:*

  Ganancia = 0,45 K_c × Banda proporcional (%) = 2,2 PB_u

  Banda integral (min/rep) = P_u/1,2

- *Controlador proporcional + integral + derivado:*

  Ganancia = 0,6 K_c × Banda proporcional (%) = 1,7 PB_u

  Banda integral (min/rep) = $P_u/2$

  Banda derivada (minutos) = $P_u/8$

En la figura 9.43 puede verse un ejemplo del método de ganancia límite.

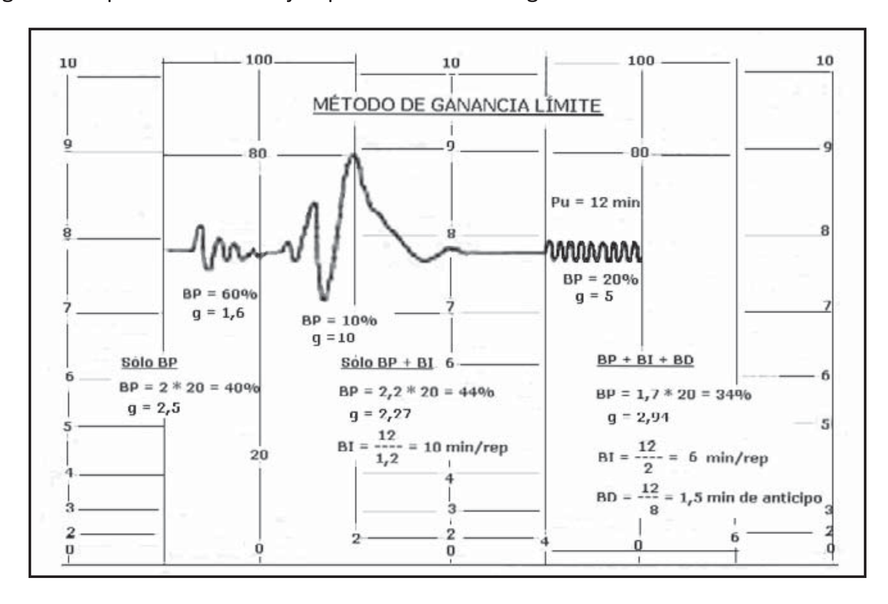


Figura 9.43 Ejemplo del método de ganancia límite

Como el método supone que el proceso es de primer orden con un tiempo de retardo de transporte, y no siempre es así, después de fijar en el controlador los valores *PID* calculados, debe realizarse un tanteo para encontrar los valores óptimos de las acciones del controlador.

Una variante del método de ganancia límite es el *método de mínimo rebasamiento del punto de consigna*. Una vez obtenida la oscilación automantenida de período P_u en minutos para una banda proporcional límite (PB_u), las acciones de control son:

Banda proporcional (%) = 1,25 PB_u

Acción integral (min/rep) = 0,6 P_u

Acción derivada (min) = 0,19 P_u

Método de curva de reacción

En una planta industrial no siempre es posible tolerar oscilaciones continuas, de modo que se emplea el método de lazo abierto, llamado también *método de Ziegler & Nichols en lazo abierto*. El procedimiento general consiste en abrir el lazo cerrado de control antes de la válvula, es decir, operar directamente la válvula con el controlador en manual y crear un pequeño y rápido cambio en escalón en el proceso de entrada. La respuesta obtenida se graba en un ordenador de la planta, o bien se introduce en un registrador de gráfico de banda con el mayor tamaño posible del gráfico para obtener la mayor exactitud.

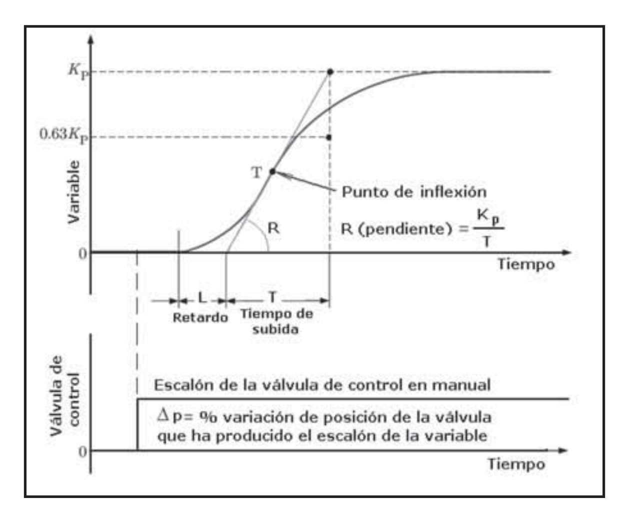


Figura 9.44 Método de curva de reacción (Ziegler & Nichols en lazo abierto)

En el punto de inflexión de la curva obtenida se traza una tangente lo más aproximada posible y se miden los valores R y L (figura 9.44):

R es la pendiente de la tangente en el punto de inflexión de la curva.

L es el tiempo de retardo, en minutos, que transcurre entre el instante del cambio en escalón de la válvula de control y el punto en que la tangente anterior cruza el valor inicial de la variable controlada.

Las fórmulas a aplicar son las siguientes:

1. Control proporcional:

$$g = \frac{\Delta p}{R \times L}$$

$$BP(\%) = \frac{100 \times R \times L}{\Delta p}$$

2. Control P + I:

$$g = \frac{0,9 \times \Delta p}{R \times L}$$

$$BP(\%) = \frac{110 \times R \times L}{\Delta p}$$

$$\text{Minutos por repeticion} = \frac{L}{0,3}$$

3. Control P + I + D:

$$g = \frac{1,2 \times \Delta p}{R \times L}$$

$$BP(\%) = \frac{83 \times R \times L}{\Delta p}$$

$$\text{Minutos por repeticion} = \frac{L}{0,5}$$

$$\text{Minutos de anticipo} = 0,5 \times L$$

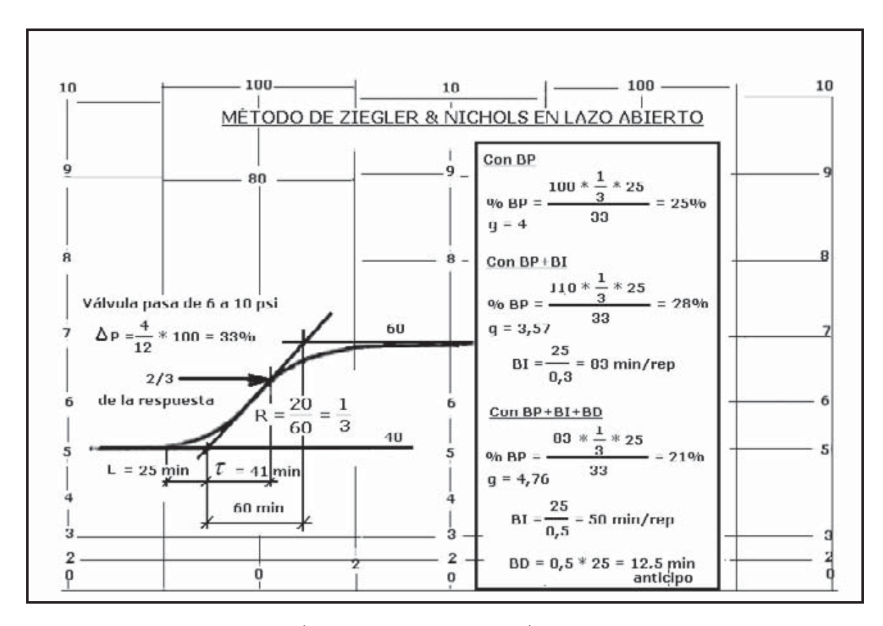


Figura 9.45 Ejemplo del método de curva de reacción (Ziegler & Nichols en lazo abierto)

En la figura 9.45 puede verse un ejemplo del método de curva de reacción.

El método de Ziegler & Nichols se caracteriza por una respuesta lenta cuando existe un retardo considerable en el poceso, es decir una constante de tiempo importante cuando el proceso está en lazo abierto, en cuyo caso sería necesario ajustar el controlador con altas ganancias para una mayor rapidez, lo que conduciría a una inestabilidad en el proceso. El *método de Cohen-Coon,* presentado el año 1953, corrige este inconveniente.

Análogamente al método de Ziegler & Nichols, con el proceso estable, introduce en manual, un escalón en la variable del proceso, mediante la válvula de control. Mide parámetros de tiempo y la ganancia del proceso. Las fórmulas recomendadas para optimizar las predicciones del método de Cohen-Coon, con el fin de obtener una mínima desviación y una razón de amortiguación de ¼, son:

$$t_1 = \frac{t_2 - ln(t_3)}{1 - ln(2)}$$

$$\tau = t_3 - t_1$$

$$\theta = t_1 - t_0$$

$$r = \frac{\theta}{\tau}$$

$$K_p = Ganancia\ del\ proceso\ = \frac{B\left(Incremento\ de\ la\ variable\right)}{A\left(señal\ en\ escalón\ de\ la\ válvula\ de\ control\right)}$$

siendo:

t_0 = tiempo de inicio del escalón

t_2 = tiempo de llegada a la mitad del valor final de la variable

t_3 = constante de tiempo (llegada al 63,2% del valor final de la variable)

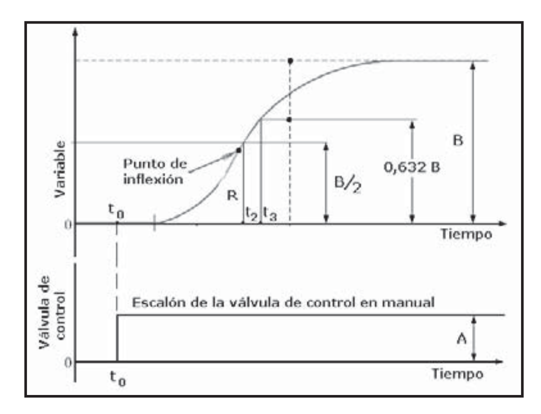


Figura 9.46 Método de curva de reacción de Cohen-Coon

1. Control proporcional:

$$g = \frac{1}{K_p \times r} \times \left(1 + \frac{r}{3}\right)$$

$$BP(\%) = \frac{100 \times K_p \times r}{1 + \frac{r}{3}} = \frac{300 \times K_p \times r}{3 + r}$$

2. Control P + I:

$$g = \frac{1}{K_p \times r} \times \left(0,9 + \frac{r}{12}\right)$$

$$BP(\%) = \frac{100 \times K_p \times r}{0,9 + \frac{r}{12}} = \frac{1200 \times K_p \times r}{10,8 + r}$$

$$Minutos\ /\ repetición = \theta \times \left(\frac{30 + 3r}{9 + 20r}\right)$$

3. Control P + I + D:

$$g = \frac{1}{K_p \times r} \times \left(\frac{4}{3} + \frac{r}{4}\right)$$

$$BP(\%) = \frac{100 \times K_p \times r}{\frac{4}{3} + \frac{r}{4}} = \frac{1200 \times K_p \times r}{16 + 3r}$$

$$Minutos\ /\ repetición = \theta \times \left(\frac{32 + 6r}{13 + 8r}\right)$$

$$Minutos\ de\ anticipo = \theta \times \frac{4}{11 + 2r}$$

Hay que señalar que los procedimientos de ganancia límite y de curva de reacción fueron deducidos, empíricamente, después de analizar muchos tipos de procesos industriales y ambos se basan en la respuesta del proceso ante una perturbación. Como esta perturbación es provocada, se corre el riesgo de abandonar las condiciones normales de trabajo del lazo de control. Por otro lado, es evidente que las características del proceso no permanecen constantes en todo momento, por lo cual puede ocurrir que los valores de las acciones, determinados en unas condiciones de carga dadas, se aparten de las bandas convenientes para otras condiciones de carga distintas. De aquí, que es preferible realizar los ensayos en las peores condiciones de carga del proceso para que, de este modo, los ajustes del controlador sean válidos en todas las condiciones de servicio.

Observaciones análogas pueden aplicarse a las bandas determinadas con el método de tanteo debiendo señalar que, para afinar los ajustes determinados con los otros dos métodos, es conveniente realizar un procedimiento de tanteo adicional.

Métodos de ajuste automático

Los métodos descritos anteriormente precisan con frecuencia de un tanteo sobre el proceso de las acciones calculadas. Si el tiempo de respuesta del proceso es de varios minutos, el procedimiento de tanteo puede llevar días para encontrar valores de las acciones que estabilicen el proceso. Aunque el ajuste de los controladores lo lleva a cabo un instrumentista o bien el operador de la planta, el gran número de lazos de control es un inconveniente serio para el ajuste de los instrumentos, dado que una persona puede ser responsable de 300 a 1000 lazos de control. En estos casos, es recomendable elegir un instrumento controlador que disponga de un algoritmo de autoajuste de las acciones de control que le permita sintonizar una amplia gama de procesos industriales (figura 9.47).

En 1984, Karl Johan Astrom y Tore Hagglund del Instituto de Tecnología de Lund (Suecia) idearon el *método del relé* basado en sustituir temporalmente el controlador por un relé (controlador todo-nada), aplicar un escalón al proceso y mantenerlo hasta que la oscilación resultante haga que la variable cruce el punto de consigna. En este momento, el relé aplica un escalón negativo hasta que la variable vuelve a cruzar el punto de consigna en sentido opuesto. Aplica, de nuevo, otro escalón positivo y así sucesivamente. De este modo, se obtiene una oscilación continua en la que se determinan el tiempo de una oscilación (periodo límite T_u) y la amplitud relativa de dos oscilaciones (a/b), que multiplicada por 4/π da la ganancia límite (P_u).

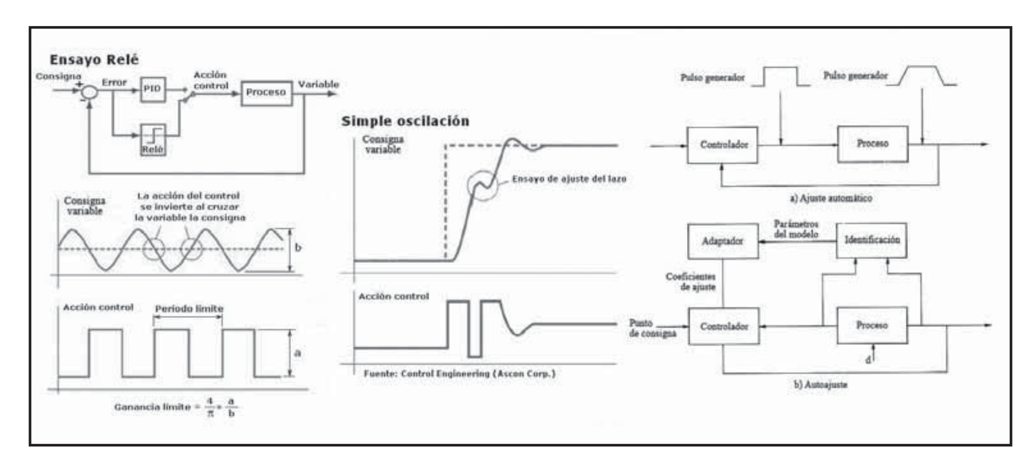


Figura 9.47 Métodos de ajuste automático

Los controladores comerciales disponen de velocidades de respuesta seleccionables (lenta, media y rápida) y el controlador selecciona, automáticamente, las reglas del autoajuste. Muchos controladores comerciales autoajustables estimulan el proceso con un ciclo limitado de oscilaciones para no perturbarlo excesivamente, y otros se limitan a trabajar con una sola oscilación.

Existen varias formas de realizar el autoajuste:

a) La *aplicación de una señal de prueba al proceso, y el análisis de su respuesta* con la obtención de un modelo matemático y el diseño analítico del controlador, o bien el uso de las formas del método de ganancia límite de Ziegler y Nichols.

   En el primer caso, tal como el método de Nishikawa, Sannomiya, Ohta y Tanaka (1984), el operador envía una señal de prueba y el sistema obtiene un modelo que minimiza la señal de error:

$$\int_0^\infty e(t) \times e^{(\beta t)^2} \times dt$$

   donde β está relacionado con la razón de amortiguamiento. Una vez estimadas las características del modelo, lo que precisa un cierto tiempo (tanto mayor cuanto más oscilatoria sea la respuesta), el ordenador calcula los parámetros *PID* que minimizan el error.

   Los *métodos de Chindambara (1970) y de Kraus y Myron (1984)* están basados en el método de ganancia límite. Analizan la señal de error obtenida ante cambios en el punto de consigna o en la carga del proceso y son fácilmente programables en el ordenador del proceso.

b) El *análisis continuo* u *ocasional* (ante una perturbación o una modificación del punto de consigna) del proceso sin aplicar señales de prueba, sin perturbar, pues, el proceso, pero con el inconveniente de no detectar los cambios lentos del mismo. Se trata de *controladores adaptativos*.

   El ordenador puede utilizarse para ajustar las acciones de control con técnicas "*off-line*", que trabajan con modelos dinámicos del proceso, y con técnicas "*on-line*", que identifican la dinámica del proceso con la planta en operación. El ordenador realiza los cálculos, verifica lo que ha hecho el operador y realiza los ajustes en el controlador.

A señalar que, en los controladores analógicos neumáticos o electrónicos, el ajuste de los valores de las acciones se realiza en diales de pequeño diámetro con graduaciones muy separadas, con lo cual la exactitud del ajuste no supera el ± 15% del valor seleccionado. Por contra, los controladores digitales permiten ajustes exactos y repetitivos, lo que es, indudablemente, una ventaja si cualquier aparato es sustituido por razones de mantenimiento. Sin embargo, los algoritmos de control de los fabricantes, si bien disponen de las tres acciones *PID*, tienen comportamientos diferentes dependiendo de las funciones incorporadas. En ocasiones, la sustitución de controladores antiguos por otros nuevos, en los que se fijaron los mismos valores ajustados de las acciones de control, comportó la inestabilidad de los lazos, debido a que los algoritmos de los nuevos diferían de los antiguos.

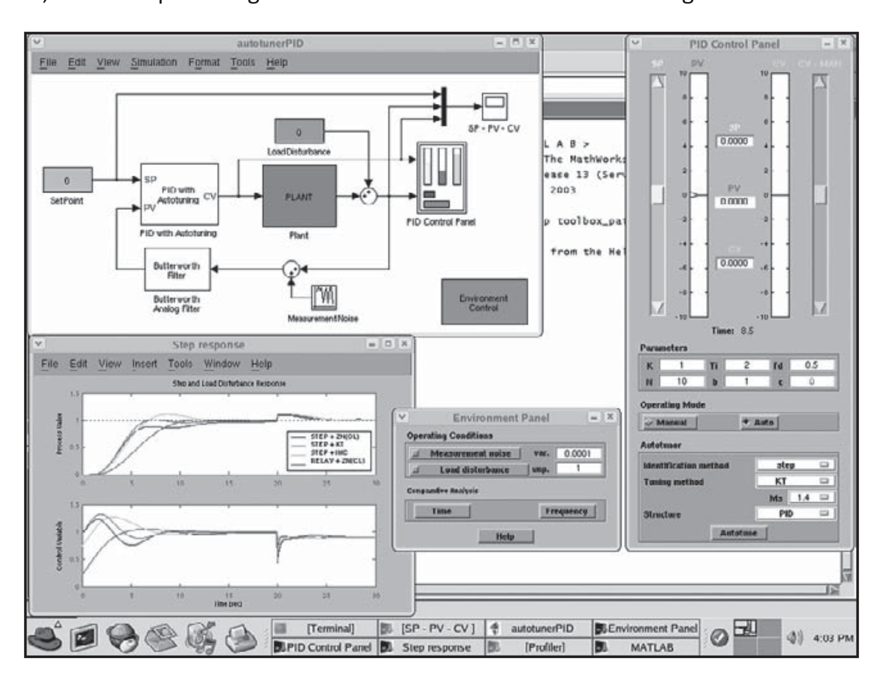


Figura 9.48 *Autoajuste de un controlador PID con el ordenador. Fuente: Matlab*

En el caso del control distribuido o integrado, el fabricante tiene disponibles varios algoritmos de control que complementan la clásica regulación proporcional + integral + derivativa, y que permiten también el autoajuste de las unidades de control, con la tendencia actual a utilizar sistemas expertos para el ajuste de los controladores en los procesos complejos y críticos. El sistema experto contiene, por un lado, los sistemas de tanteo (prueba y error) para el ensayo de los ajustes de las acciones de control y la comprobación de sus efectos en el comportamiento del lazo y, por el otro, el desarrollo y el mantenimiento de alguna propiedad del proceso que permita la crítica y el cambio de los ajustes realizados con el método de tanteo.

9.10 Otros tipos de control

9.10.1 Generalidades

Se han visto ahora sistemas de regulación basados en la realimentación continua de la señal de error del proceso a través del controlador, consiguiéndose gracias a las características de estabilidad del

lazo cerrado de control la reducción gradual del error hasta que éste se anula apreciablemente dentro de los límites de exactitud de los instrumentos (o se estabiliza si sólo existe acción proporcional y hay *offset*).

Una gran ventaja del sistema de realimentación es que no es necesario un conocimiento completo de las características del proceso, ya que el control se inicia al presentarse una señal de error y el controlador realiza la corrección de forma externa al proceso.

Sin embargo, una gran desventaja que presenta el control de realimentación es, precisamente, la necesidad de que exista una señal de error para que el controlador actúe iniciando la corrección, es decir, que cuanto más retardo posea un proceso tanto más difícil será controlarlo con el sistema clásico de realirnentación, ya que con tanto mayor retardo actuará el instrumento y, en el intervalo de tiempo "muerto", las características del proceso pueden haber variado.

De aquí que se ha generalizado la aplicación de otras técnicas de control que son variantes o completan las *P*, *PI* o *PID* estudiadas o bien constituyen otro enfoque completamente distinto del clásico.

9.10.2 Control en cascada

Una de las técnicas para mejorar la estabilidad de un circuito complejo es el empleo del *control en cascada*. Se utiliza cuando la variable controlada no puede mantenerse dentro del punto de consigna, por óptimos que sean los ajustes del controlador, debido a las perturbaciones que se producen en alguna condición del proceso.

Una aplicación típica se encuentra en el calentamiento de un horno que utiliza fuel-oil como combustible, cuyas características pueden cambiar por variación de la presión, de la temperatura o de la viscosidad (figura 9.49). Estos cambios provocan variaciones de caudal, con lo que en el horno se quema una cantidad de combustible distinta para una misma posición de la válvula de control, apareciendo perturbaciones en el valor de la temperatura, difíciles de compensar por el retardo existente entre las calorías aportadas por la combustión del fuel-oil en el horno (con capacidad, resistencia y tiempo de transporte propios) y la captación de la nueva temperatura en el horno.

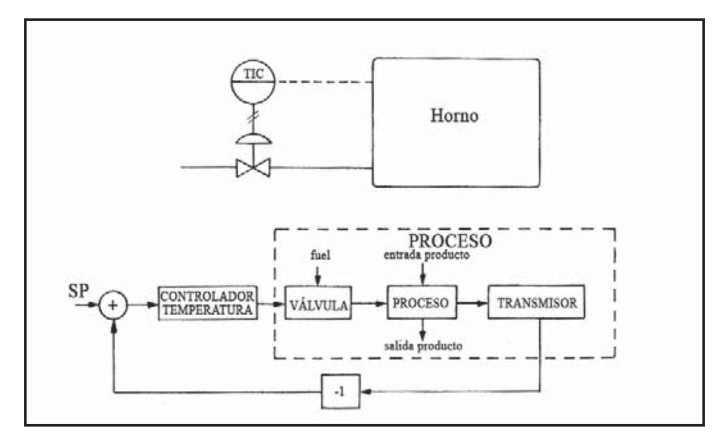


Figura 9.49 Control de realimentación de temperatura de un horno

Las variaciones de temperatura llegarán al controlador y éste reajustará la posición de la válvula de acuerdo con las acciones de que disponga. Será una casualidad que las correcciones del controlador eliminen totalmente las perturbaciones en las características del combustible (por ejemplo, la pre-

sión), ya que esas perturbaciones son totalmente al azar y hay un retardo entre las mismas y el envío de la señal de corrección del controlador a la válvula. Por lo tanto, las continuas perturbaciones en la presión, no sólo darán lugar a una corrección continua e innecesaria en la válvula, sino que perjudicarán el logro de una buena regulación pudiendo, incluso, impedir totalmente el control del proceso.

Nótese que el control de temperatura se realiza mediante la aportación del calor cedido por el fuel que pasa a través de la válvula, es decir, la temperatura es regulada más bien por el caudal de fuel (si la calidad del fuel es constante) que por la posición del vástago de la válvula. Nótese que el caudal no está controlado y que es de interés secundario (*variable secundaria*), pero es evidente que sus fluctuaciones afectan a la variable temperatura, la que necesariamente es de interés principal (*variable primaria*) en el control del proceso.

Desde el punto de vista de rapidez sería muy conveniente el ajuste rápido de posición de la válvula tan pronto como se presenta una perturbación en la presión del fuel, mientras que las variaciones de temperatura más lentas, que pueden producirse por otras causas, se irán corrigiendo para mantener la temperatura en el punto de consigna.

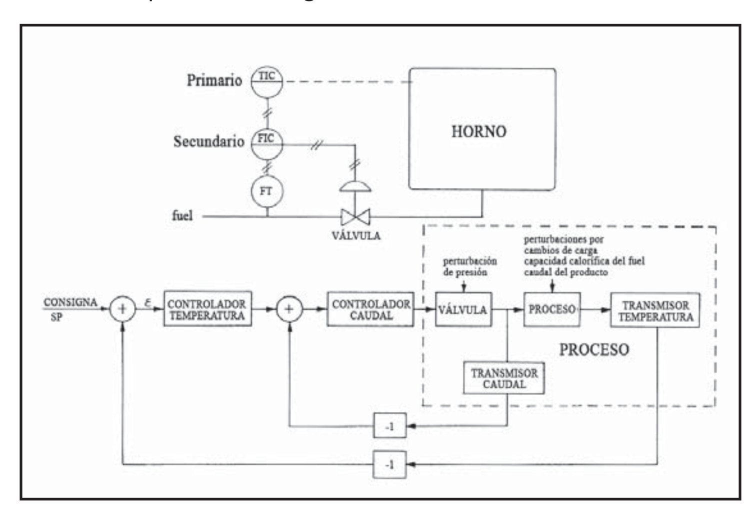


Figura 9.50 Control en cascada de la temperatura de un horno

Si la señal de salida del controlador de temperatura (*primario*) actúa como punto de consigna de un instrumento que controle el caudal y, cuya señal de salida ajuste la posición de la válvula, este segundo controlador (*secundario*) permitirá corregir rápidamente las variaciones de caudal provocadas por perturbaciones en la presión de fuel, manteniendo en el sistema, en todo momento, la capacidad para controlar la temperatura con el instrumento primario. Estos dos instrumentos conectados en serie actúan manteniendo la temperatura constante, el controlador de temperatura manda y el de caudal obedece. Esta disposición se denomina *control en cascada*.

Para que el control en cascada sea eficaz es necesario escoger, adecuadamente, la variable secundaria, teniendo en cuenta las perturbaciones que pueden presentarse y las velocidades de respuesta de los distintos componentes del proceso.

Para seleccionarla pueden seguirse los siguientes pasos:

1. Dibujar el diagrama de bloques del posible sistema en cascada.

2. El lazo secundario debe incluir la perturbación posible más importante.
3. El lazo secundario debe ser de respuesta rápida y, para ello, debe incluir los retardos mínimos del sistema de control. Como guía, la relación de constantes de tiempo entre el lazo principal y el lazo secundario debe ser como mínimo de 3, e idealmente de 5 a 10.

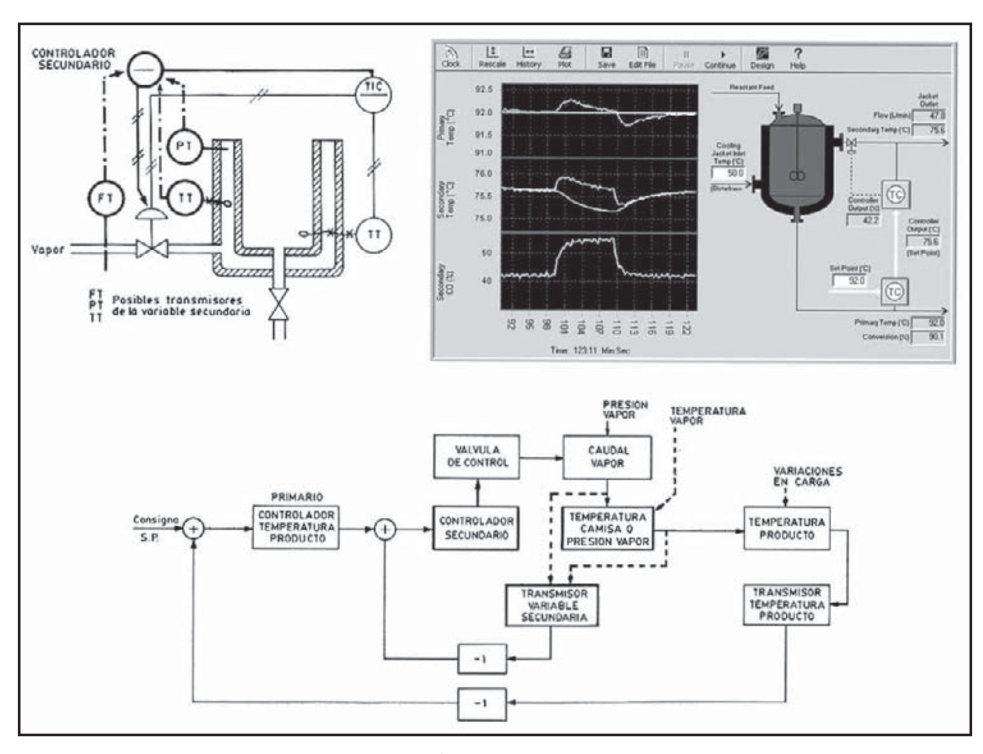


Figura 9.51 Control de temperatura de un líquido en un tanque encamisado. Fuente: Loop-ProTrainer

4. Los puntos de consigna de la variable secundaria deben estar relacionados directamente con los de la variable primaria y, a ser posible, su relación debe estar representada por una recta en preferencia a una línea curva. De este modo se simplificará el ajuste del controlador primario.
5. El lazo secundario debe contener el mayor número posible de perturbaciones mientras sea suficientemente rápido.
6. La variable secundaria seleccionada debe proporcionar una estabilidad al control secundario con la ganancia más alta que sea posible (*BP* más baja).

Como ejemplo puede verse en la figura 9.52 la aplicación del control en cascada al control de temperatura de un líquido en un tanque encamisado.

De esta figura se deriva la tabla 9.3, para seleccionar la variable secundaria.

Es lógico seleccionar como variable secundaria la temperatura de la camisa.

En la figura 9.52 puede verse un ejemplo de simulación de control en cascada.

En la figura 9.53 pueden verse algunos ejemplos de control en cascada.

Ítem	Pasos	*Presión camisa A*	*Caudal vapor B*	*Temperatura camisa C*
1	Diagrama de bloques			
2	La perturbación más importante entra en el lazo secundario	Sí	Sí	Sí
3	Tprimaria/Tsecundaria	Sí	Sí	Sí
4	Variables primaria y secundaria relacionadas entre sí	Posiblemente	Sí	Sí
5	Perturbaciones adicionales	No	No	Sí
6	La ganancia del controlador secundario es relativamente grande	Sí	No	Sí

Tabla 9.3 Selección de la variable secundaria en un control en cascada

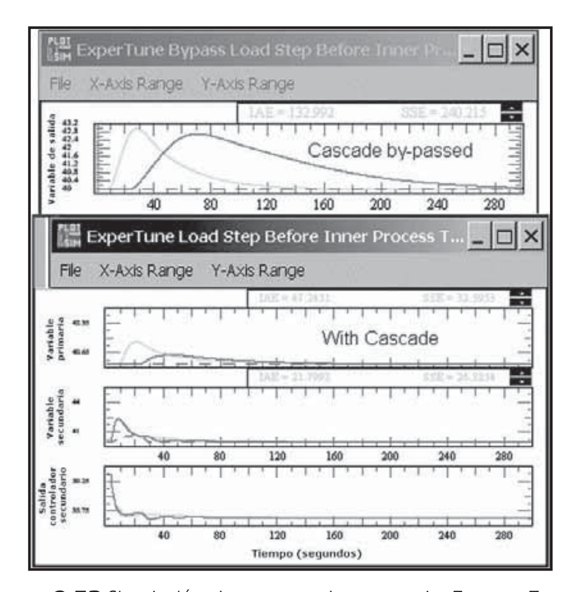


Figura 9.52 Simulación de un control en cascada. Fuente: ExperTune

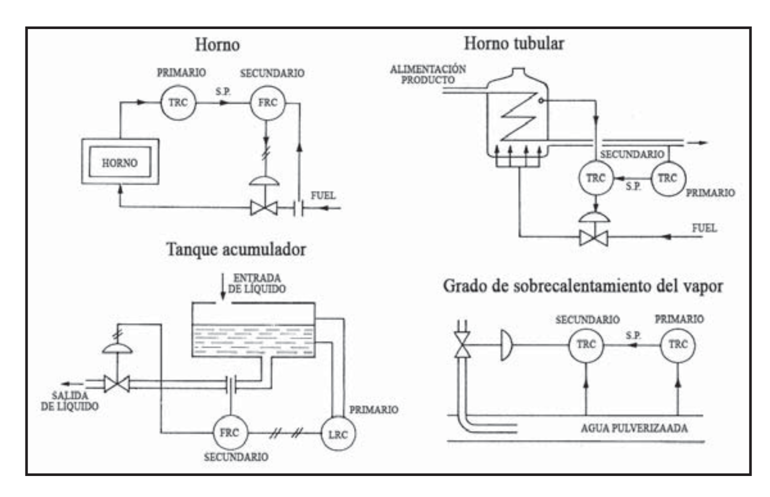


Figura 9.53 Ejemplos de control en cascada

9.10.3 Programadores

Se utilizan, generalmente, en los varios procesos industriales que siguen una relación determinada de una variable con el tiempo y, que por lo tanto, requieren un control automático para seguir y reproducir un programa fijo.

Estos instrumentos se denominan *programadores controladores* y realizan tres funciones básicas:

1. Control automático de la variable.
2. Temporización (relés y contactos auxiliares y temporizadores para funciones adicionales).
3. Variación del punto de consigna del controlador (función de programación).

El programador se compone del generador del punto de consigna, que es el componente básico del sistema que determina la temporización y fija la marcha de la variable a lo largo del tiempo, y del controlador neumático, electrónico o digital con regulación todo/nada, proporcional, *PI* o *PID*, dotado de indicación o registro de la variable.

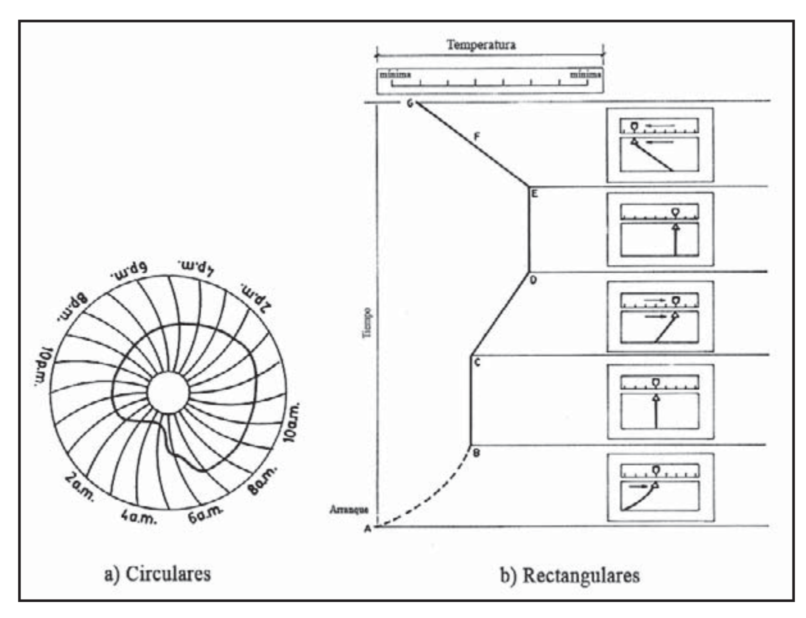


Figura 9.54 Programadores (levas y rectangulares)

Existen tres tipos de programadores:

En el *programador de levas* (figura 9.54a), el punto de consigna viene reposicionado automáticamente por una leva (accionada por un motor síncrono) cortada de acuerdo con un programa de tiempo predeterminado. Detrás de la leva (que suele ser de plástico transparente de modo que puede verse el gráfico a su través) una pluma conectada al sistema de medida del instrumento registra la variable medida. Los valores del proceso se marcan en la leva y siempre que se emplee la misma leva se obtendrá y se seguirá, automáticamente, el mismo programa.

Por otro lado, estos programadores no son demasiado flexibles. El contorno de la leva determina el programa y la más ligera desviación que requiere el proceso precisa, o bien, de una nueva leva, o bien, del recortamiento de la actual.

Los *programadores rectangulares* (figura 9.54b) son de gráfico rectangular y están equipados con motores síncronos que mueven el índice hacia arriba o hacia abajo y con varios interruptores que arrancan, controlan o terminan diferentes partes del programa.

Existen temporizadores separados que controlan la duración de los tiempos de mantenimiento o cambio de la variable y controladores de velocidad que permiten ajustar las velocidades de subida o de bajada de la variable.

Son más versátiles ya que permiten cambiar, fácilmente, la duración de los períodos de mantenimiento (curvas *BC* - *DE*) ajustando sólo los temporizadores y variar la pendiente de la variable (curvas *CD* - *EFG*) ajustando el punto de consigna de los controladores de velocidad.

Los programadores neumáticos de levas y rectangulares, prácticamente, han dejado de utilizarse en favor de los programadores digitales capaces de guardar en memoria multitud de programas, sin necesidad de utilizar levas de plástico ni motores síncronos ni gráficos de papel.

Los *programadores digitales* permiten la programación en rampa de forma fácil y repetitiva, totalmente configurable por teclado. El ordenador permite guardar un determinado número de programas (por ejemplo 20) que pueden llamarse cuando se desee con una salida por relé o analógica (4-20 mA c.c.) o digital, pudiendo visualizarse en el monitor el programa seleccionado y los resultados obtenidos en el proceso. El sistema es, pues, muy versátil e ideal en la programación de temperatura en procesos donde pueden fabricarse diversos productos en distintas condiciones de servicio, tal como en los reactores.

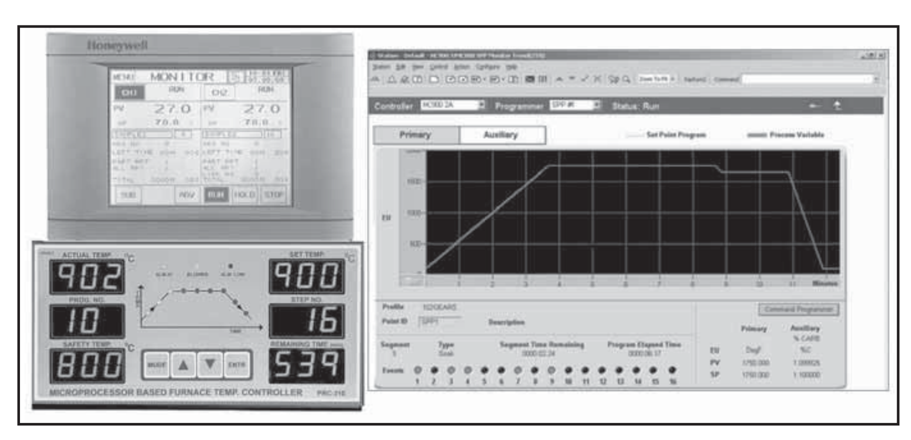


Figura 9.55 Programadores digitales. Fuente: Honeywell y Libratherm

9.10.4 Control de relación

El *control de relación* es un sistema de control en el que una variable de proceso es controlada con relación a otra variable. Mientras que el control en cascada es sólo un método que mejora la regulación de una variable, el control de relación satisface una necesidad específica, el control de la relación entre dos cantidades. En la figura 9.56 puede verse el relé de relación que se comporta como un controlador cuyo punto de consigna es la relación entre dos señales, por ejemplo, dos caudales, con lo cual controla la relación entre los mismos.

Hay que señalar que el ajuste del relé de relación es función de los campos de medida relativos de los transmisores. Si, por ejemplo, el transmisor del caudal variable (sin controlar) tiene un campo

de medida 1,5 veces mayor que el del transmisor del caudal controlado y se desea que el caudal controlado esté siempre en la proporción de 1:2 con relación al caudal variable, deberemos ajustar el dial del relé de relación en la posición:

$$\frac{1}{2} \times \frac{1,5}{1} = 0,75$$

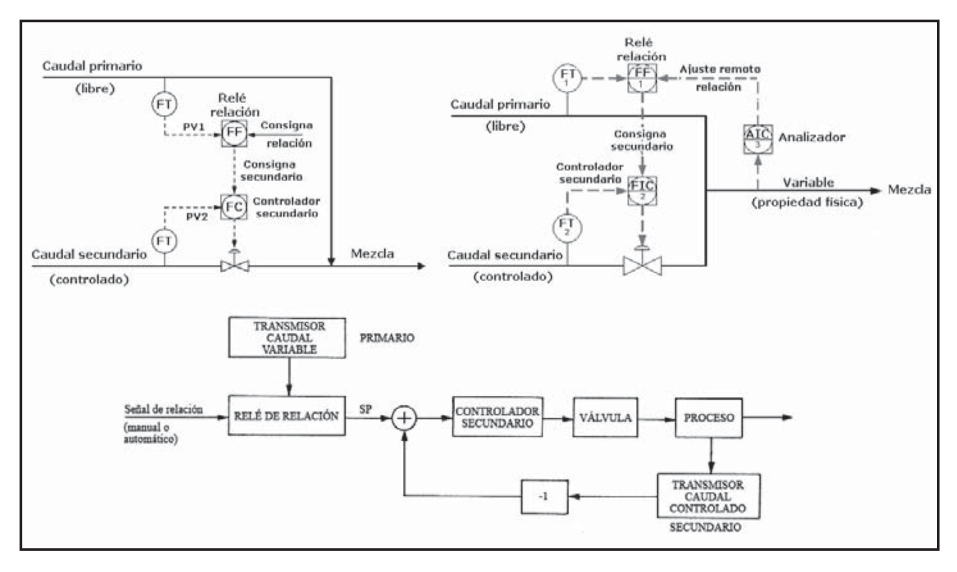


Figura 9.56 Control de relación

Por otro lado, los campos de medida de los transmisores deben estar expresados en las mismas unidades, y es necesario considerar sus campos de control que influirán inevitablemente en la exactitud de la relación entre las dos variables. En efecto, si los transmisores son cuadráticos con la rangeabilidad 4:1 y hay que mantener una razón de 0,75, el controlador perderá su exactitud cuando el caudal variable (primario) baje por debajo del 0,25% de su campo de medida, lo que equivaldrá a que se pierda también la exactitud si el caudal controlado (secundario) es inferior al 33% de su campo de medida, ya que el instrumento tiende a mantener su punto de consigna en:

$$0,75 = \frac{caudal\ primario}{caudal\ secundario}$$

El 25% de la señal salida del transmisor primario es igual al 25/0,75 (33,3%) de la señal de salida del transmisor secundario = 33,3% secundario.

Una aplicación típica del controlador de relación se encuentra en la relación caudal aire/caudal fuel en la combustión de una caldera de vapor.

9.10.5 Control anticipativo

El control de realimentación (*feedback control*) es la técnica más común empleada en el control de procesos. En este tipo de control la señal de salida (variable controlada) es comparada con un valor deseado (punto de consigna) y la señal de error actúa sobre el controlador.

En sistemas que poseen tiempos de retardo importantes con desviaciones de magnitud y duración distintas, la señal de error es detectada mucho tiempo después que se ha producido el cambio de carga, por lo cual, la corrección correspondiente es retardada y ocurre, a veces, que actúa cuando ya no es necesaria porque se ha eliminado el cambio de carga que dio lugar a la corrección. Este problema puede resolverse en algunas aplicaciones introduciendo el control en cascada ya estudiado. Sin embargo, no deja de tener el inconveniente de necesitar que se produzca una desviación antes de actuar.

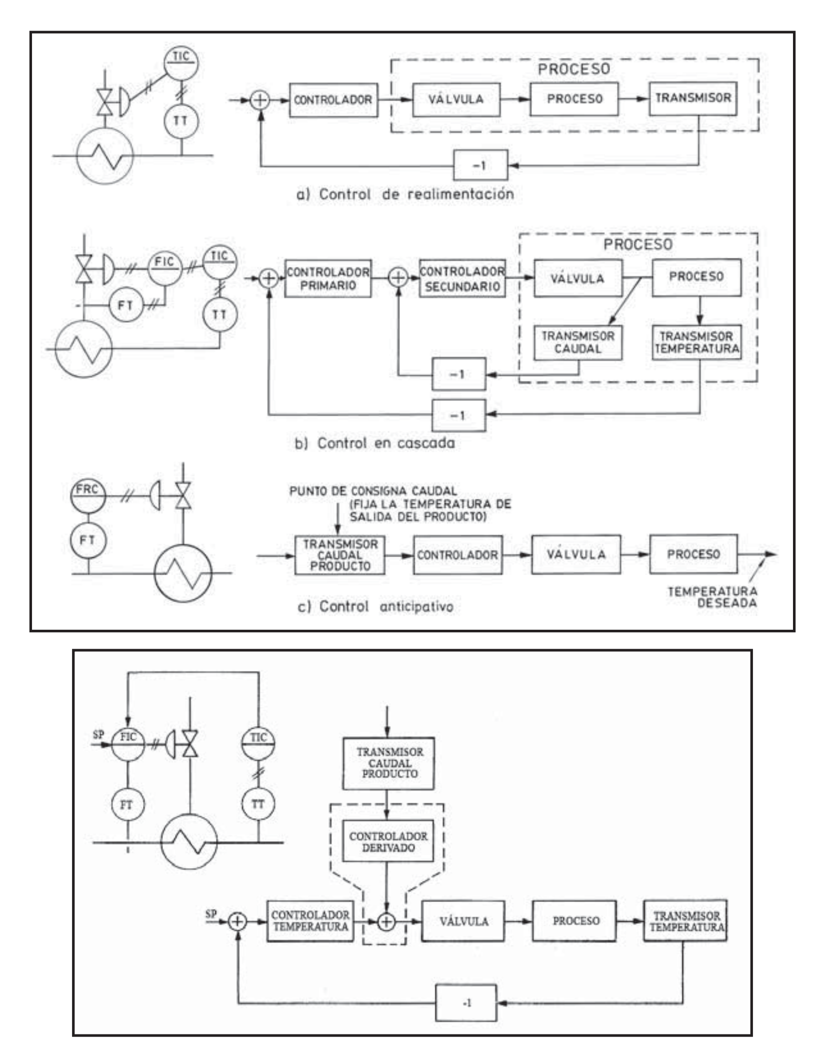


Figura 9.57 Control de realimentación y anticipativo estático (static feedforward)

El control anticipativo (*feedforward*) se caracteriza por utilizar un microprocesador (que actúa como un controlador) que parte de la medida de una o más variables de entrada, que influyen en el valor de la variable que interesa estabilizar, calcula la señal de corrección mediante un modelo del proceso, y acciona la válvula de control sin utilizar el clásico lazo de retroalimentación. Es decir, el accionamiento de la válvula tiene lugar en lazo abierto.

La eficacia del controlador depende de la exactitud que se consiga en la medida de la variable o variables de entrada y de la exactitud alcanzada en el modelo calculado del proceso. Por otra parte, hay que señalar que es costoso y, a veces, imposible determinar y duplicar el modelo exacto del proceso. Por lo tanto, siendo realmente un control en lazo abierto, su aplicación aislada dará lugar a un *offset* variable y significativo, es decir, la variable de salida (en general es la temperatura) se apartará significativamente de la deseada.

En resumen, puede afirmarse que el control de realimentación puede controlar bien en régimen permanente, pero no lo hace satisfactoriamente en condiciones dinámicas de funcionamiento del proceso. En cambio, el control anticipativo es capaz de seguir rápidamente los cambios dinámicos, pero puede presentar un *offset* considerable en la variable de salida. Afortunadamente, las dos técnicas pueden combinarse para obtener un control dinámico sin *offset*, tal como puede verse en la figura 9.57.

En esta figura, el controlador anticipativo es de acción derivada. De este modo, si el caudal es fijo, la señal procedente del controlador de temperatura pasa sin cambios hacia la válvula. En cambio, si se presentan variaciones en el caudal, la señal derivada correspondiente se suma o se resta, según el sentido de la variación, a la de temperatura.

De este modo, los cambios de carga en el caudal del producto son detectados y corregidos inmediatamente, y compensan los cambios anticipados que, por esta causa, pudieran producirse en la temperatura.

Esta disposición recibe el nombre de "*control anticipativo estático*" y se emplea cuando el proceso dé cambios en las perturbaciones y en la variable manipulada. El control combinado anterior es relativamente sencillo, no tiene en cuenta las perturbaciones posibles en el vapor ni las variaciones en la temperatura del producto de entrada, ni la velocidad del producto a través del intercambiador.

En la figura 9.58 puede verse otro tipo de control anticipativo más perfecto, que recibe el nombre de "*control anticipativo dinámico*" dotado de un relé de adelanto-retardo (el lazo de control se ajusta más a las características dinámicas del proceso) combinado con el clásico control de realimentación.

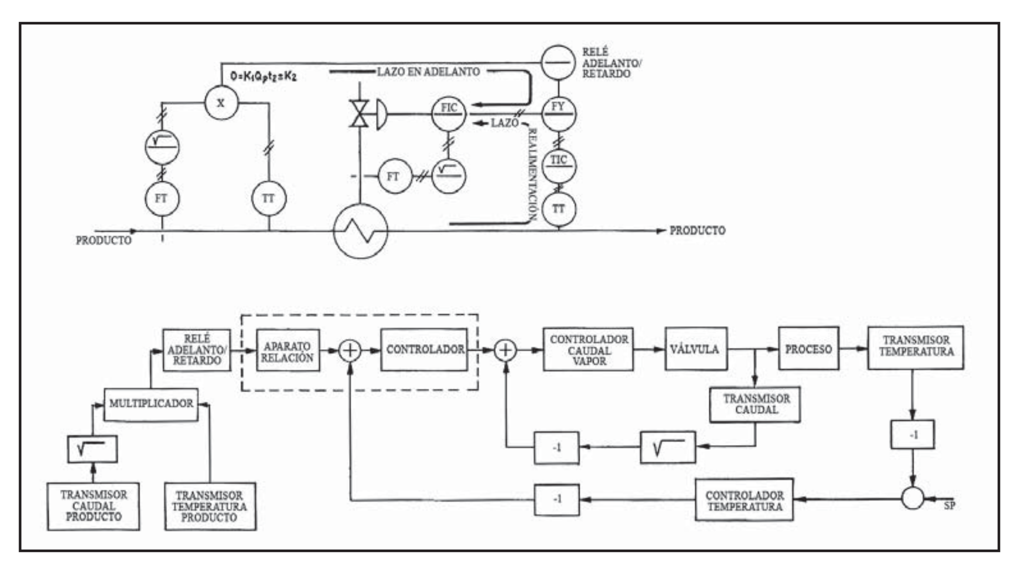


Figura 9.58 Control anticipativo dinámico

El control anticipativo es útil en los siguientes procesos:

a) Procesos con tiempos muertos y retardos considerables, difíciles o casi imposibles de controlar con el clásico control de realimentación (caso más frecuente de aplicación del control anticipativo).
b) Procesos en los que la variable a controlar no puede medirse con exactitud o de modo continuo.
c) Procesos en los que la variable a controlar no es fija y viene determinada por otra variable o variables que deben ser máximas o mínimas.
d) Procesos exotérmicos donde interese obtener el máximo rendimiento controlando la temperatura a un valor próximo a la temperatura de disparo de la reacción exotérmica.

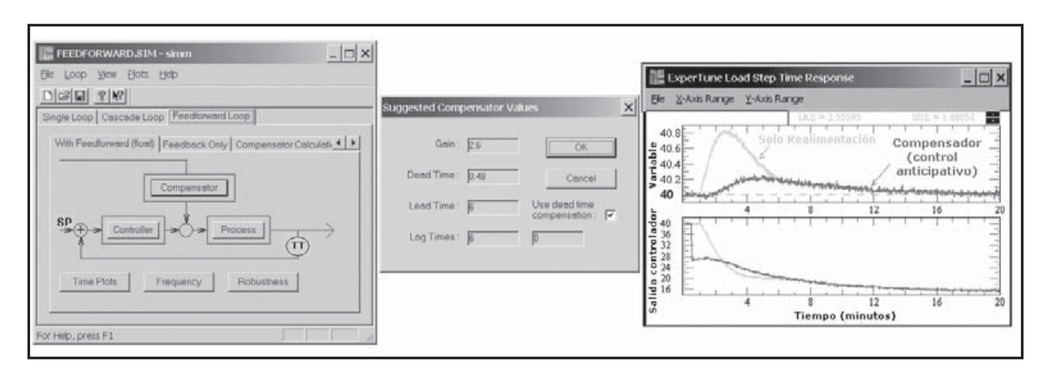


Figura 9.59 *Simulación de un control anticipativo. Fuente: ExperTune*

9.10.6 Control de gama partida

Es una forma de control en el que una variable manipulada tiene preferencia con relación a otra u otras del proceso. En la figura 9.60 puede verse este tipo de control aplicado a dos intercambiadores de calor en serie.

La instalación se utiliza para calentar un producto cuyo caudal es muy variable; cuando es bajo basta un solo intercambiador para calentarlo y cuando la fabricación es la máxima son necesarios los dos.

Suponemos que, desde el punto de vista de seguridad, las válvulas deben cerrar en caso de fallo de aire, por lo cual el controlador de temperatura debe ser de acción inversa (al aumentar la temperatura baja la señal de salida). Si el caudal de producto es bajo, actuará la válvula de vapor V-1, porque la señal de salida estará comprendida entre el 50% y el 100% (9-15 psi o 0,2-1 bar).

A medida que aumenta el caudal, el controlador de temperatura baja la señal gradualmente hasta que, cuando la señal baja de 50% (9 psi o 0,6 bar), la válvula V-1 permanece totalmente abierta con el primer intercambiador trabajando al máximo, y la válvula de control V-2 empieza a abrir, iniciando el funcionamiento del segundo intercambiador. A un caudal máximo determinado, las dos válvulas de control están abiertas y los dos intercambiadores trabajan conjuntamente.

La partición de la señal se logra usualmente mediante posicionadores acoplados a las válvulas de control que convierten el campo de la señal de entrada electrónica (4-20 mA c.c.) a 0,2 1 bar (3-15 psi), o bien mediante convertidores *I/P* (intensidad a presión).

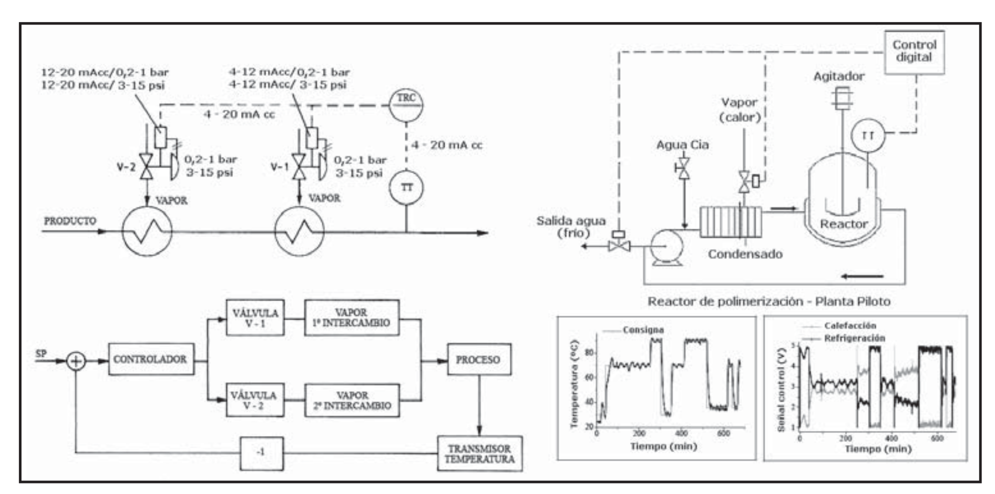


Figura 9.60 *Control de gama partida*

Otro tipo de control de gama partida es el control dúplex proporcional en tiempo que se aplica a cámaras térmicas que se controlan a temperaturas inferior y superior a la temperatura ambiente, mediante dos válvulas de solenoide accionadas por relés (figura 9.61). El relé nº 1 puede actuar con impulsos en un refrigerador y el relé nº 2 lo hace sobre una resistencia de calefacción.

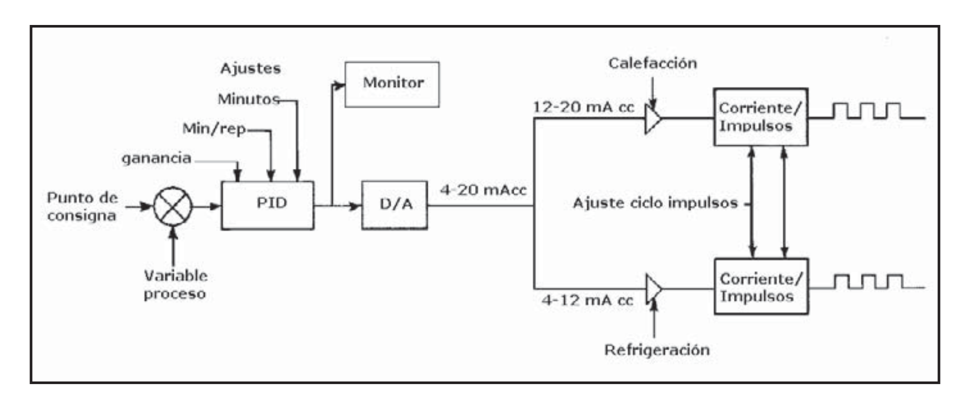


Figura 9.61 *Control de gama partida dúplex*

9.10.7 Control selectivo

Este tipo de *control selectivo (override control)* se emplea, básicamente, para limitar la variable de proceso en un valor alto o bajo, con el objeto de evitar daños en el proceso o en el producto. Algunas aplicaciones típicas residen en la protección de presión de un compresor con regulación del caudal de descarga, la utilización de varios tipos de combustibles en una caldera de vapor, el bombeo en oleoductos (figura 9.62), etc.

En esta última aplicación hay dos controladores de presión de la bomba, uno en la aspiración y el otro en la impulsión y una de las dos señales de salida es seleccionada por un relé selector en comunicación con la válvula de control.

El control se efectúa en condiciones de funcionamiento normales con el controlador de impulsión y, cuando por cualquier avería baja la presión de aspiración de la bomba por debajo del límite de seguridad, debe entrar en funcionamiento el controlador de aspiración en lugar del de impulsión. Para conseguirlo, este último instrumento es de acción inversa, el punto de consigna del controlador de aspiración es inferior a los valores normales de trabajo y el relé selector selecciona la mínima de las dos señales que le llegan.

De este modo, el control normal se efectúa con el controlador de impulsión. La bomba es controlada por la presión de aspiración sólo cuando ésta baja demasiado de valor y llega a ser inferior a su punto de consigna. Entonces, la señal de salida del controlador de aspiración disminuye y llega a ser inferior a la señal de salida del controlador de impulsión, con lo cual el relé selector la selecciona y así la válvula pasa a ser controlada directamente por la presión de aspiración.

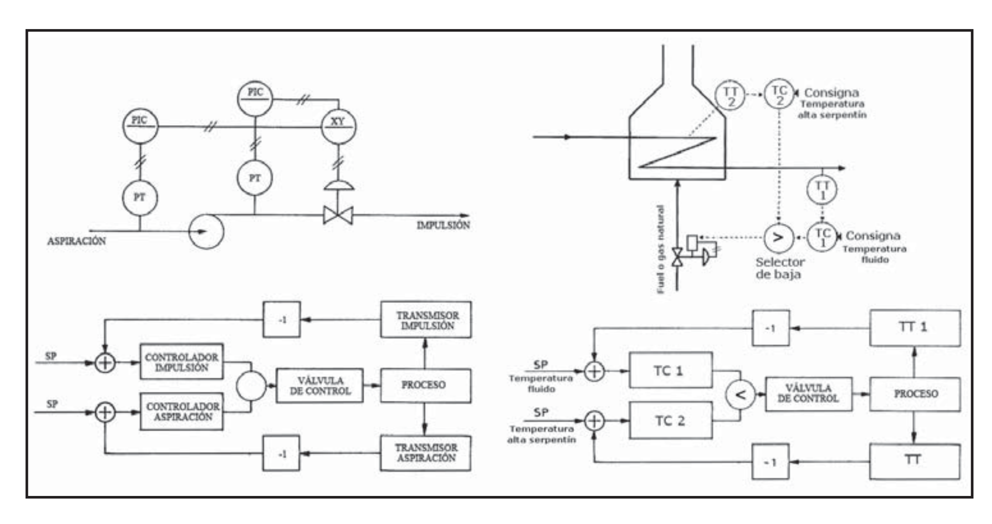


Figura 9.62 Control selectivo

En otra aplicación, en un horno calefactor con un serpentín por donde pasa el fluido, interesa proteger el tubo del serpentín contra temperaturas excesivas que puedan sobrecargarlo o bien quemar el producto. La temperatura de salida del serpentín es controlada normalmente con una válvula de combustible (fuel-oil o gas natural). Por seguridad, la válvula es de sin aire cierra (aire para abrir), de modo que el controlador TC-1 tiene que ser de acción inversa, es decir, a más temperatura, debe bajar su señal de salida para cerrar gradualmente la válvula según sus acciones de control.

El controlador TC-2 es también de acción inversa (al aumentar la temperatura disminuirá su señal de salida) y dispone de una ganancia alta. En el caso de que capte una temperatura excesiva en el tubo del serpentín, su señal de salida será de 4 mA c.c. y es la que tomará el selector de baja. Cuando la temperatura del serpentín vuelva a la normalidad, la señal de salida del TC-2 será 20 mA c.c. y el sistema volverá al control de temperatura de TC-1.

9.10.8 Control de procesos discontinuos

En la industria química, en particular en la fabricación de polímeros, resinas, fibras y elastómeros se utilizan procesos discontinuos (*batch*). En un reactor se introducen los productos a transformar y se someten a un programa de temperaturas determinado para cada producto resultante, repitiéndose

la fabricación ciclo tras ciclo. Es esencial la uniformidad en la calidad del producto obtenido a través de los procesos discontinuos que se repiten, así como es conveniente la regulación precisa de las condiciones de la reacción para obtener siempre la misma calidad en el producto y evitar la pérdida, total o parcial, de una operación.

Entre estas condiciones de reacción se encuentra la temperatura. Si el proceso no admite "*offset*", que suele ser el caso usual, es necesario que el controlador tenga como mínimo acción *PI*. Como entre el final de una operación (descarga del reactor) y el principio de la siguiente (carga de los productos y cierre del reactor) pasa un cierto tiempo, el error que se produce entre el punto de consigna y la temperatura (que baja hasta casi la temperatura ambiente) da lugar a que se acumule la acción integral, con lo que la señal de salida es máxima y la válvula de control queda totalmente abierta, es decir el actuador de la válvula se satura. El error existente continúa siendo integrado por el controlador y la acción integral continúa creciendo (*reset windup*) hasta que el proceso vuelve a la normalidad, pero mientras el error sea positivo, el sistema continuará con la acción integral creciendo. Sólo cuando la variable, en descenso, cruza el punto de consigna, el error será negativo y, al cabo de un tiempo suficientemente largo, la señal a la válvula empezará a disminuir gracias al decrecimiento de la acción integral.

Al estar la válvula de vapor completamente abierta durante un tiempo largo, la temperatura sobrepasará ampliamente el punto de consigna y habrá después una oscilación amortiguada, lo que es evidentemente perjudicial en un proceso discontinuo (*batch*).

Hay que señalar que la acumulación de la acción integral descrita también puede presentarse cuando falla temporalmente la señal de entrada o bien se presenta una perturbación considerable de larga duración.

Una forma de ver el fenómeno de la saturación integral es considerar que, al estar la válvula de control totalmente abierta, da como resultado el desplazamiento de la banda proporcional con su límite inferior coincidiendo con el punto de consigna (si la variable estuviera por un tiempo por encima del punto de consigna ocurriría a la inversa y el límite superior de la banda proporcional bajaría hasta el punto de consigna). En la figura 9.63 puede verse la traslación de la banda proporcional.

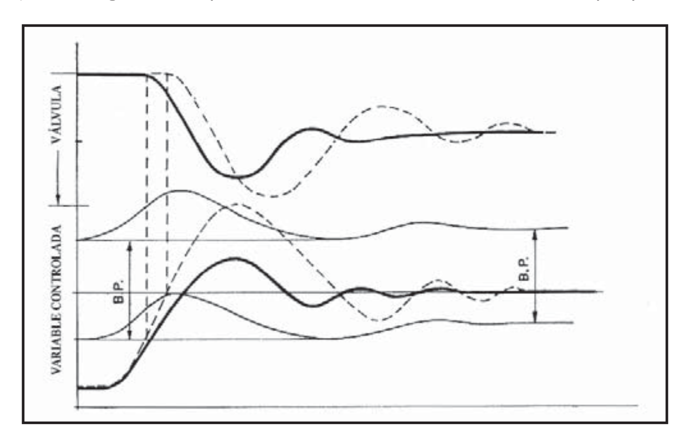


Figura 9.63 Control de procesos discontinuos (desplazamiento banda proporcional)

Este corrimiento de la banda proporcional da lugar a elevadas oscilaciones de la temperatura al inicio de la operación, ya que la válvula de control empieza a cerrar sólo cuando la variable cruza el

punto de consigna porque entonces, y sólo entonces, el error entre la variable y el punto de consigna cambia de signo y la acción integral inicia ya la corrección.

En los instrumentos neumáticos, la protección contra este fenómeno indeseable de la acción integral se asegura con un dispositivo que vacía de aire el fuelle de la acción integral cuando existe la posibilidad de saturación, por ejemplo, si la señal neumática ya pasa de 1,1 bar (16 psi). En los instrumentos electrónicos, una solución es descargar el condensador de la acción integral cuando la señal de salida pasa ampliamente de los 20 A c.c.

En el control digital pueden utilizarse los siguientes métodos.

1. Cálculo al revés y seguimiento. Cuando la salida está saturada, el ordenador recalcula el término integral en base a la diferencia entre la salida del controlador y la de un modelo del actuador, con lo que rompe la cadena del crecimiento de la acción integral al bypasar el bloque del módulo integrador.
2. Integración condicional. Se fija la acción integral en un valor constante cuando la salida del controlador está saturada (error positivo), o bien, cuando se presenta un error importante.
3. Se incorpora un modelo de saturación que carga la acción integral con valores predefinidos cuando se satura la señal de salida. Su uso principal es ajustar, en la puesta en marcha, el rebasamiento de la temperatura por encima del punto de consigna cuando hay un gran cambio en el punto de consigna.

Los controladores que disponen de sistemas anti-saturación de la acción integral (*reset windup*) se llaman controladores para procesos discontinuos (*batch controllers*).

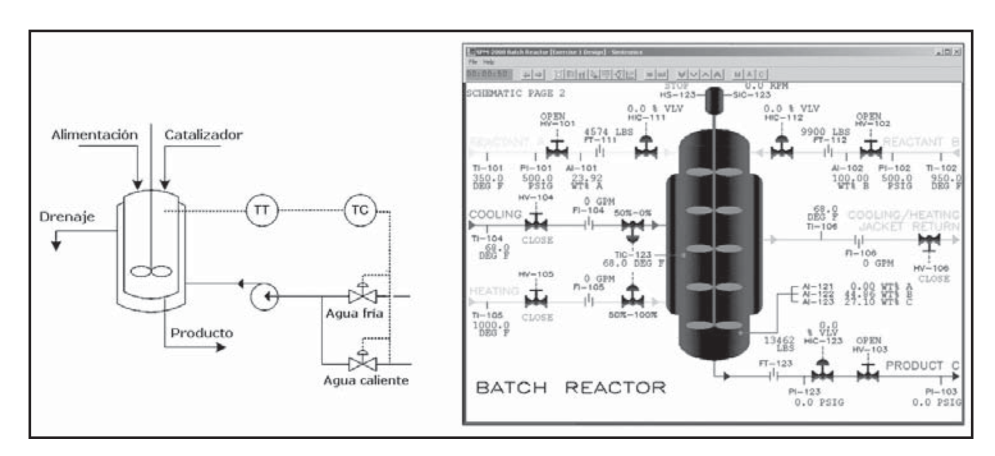


Figura 9. 64 Reactor discontinuo. Fuente: Simtronics

9.10.9 Controladores no lineales

Existen procesos continuos que presentan cambios dinámicos considerables dependiendo del punto de operación, es decir, que sus ganancias y constantes de tiempo son variables según cuál sea el valor de alguna o algunas variables de la planta. Son procesos altamente *no lineales* que hacen difícil conseguir una buena sintonización del controlador. Para convertir el proceso en lineal bastará situar una válvula de control de característica opuesta a la del propio proceso, que en general, para los procesos moderadamente no lineales, será de igual porcentaje.

Sin embargo, en un proceso que es altamente no lineal, tal como el de pH (figura 9.65), con el punto de consigna en A, la ganancia necesaria para la estabilidad en el controlador (relación incrementos de la señal de salida a la válvula de control de la variable del proceso) es baja (por ejemplo 0,05). Si por cualquier cambio de carga la variable pasa al punto B o al C, la baja ganancia del controlador hará que el pH del proceso permanezca en B o en C, y que se añada al sistema el reactivo suficiente para que el pH vaya pasando alternativamente de B a C, dibujándose en el registrador una zona rayada entre B y C.

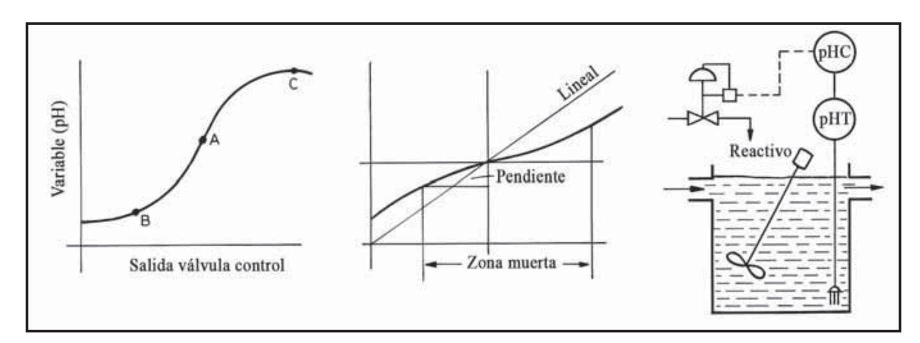


Figura 9.65 Controladores no lineales

Para controlar correctamente el proceso será necesario que el controlador disponga de autoajuste de las acciones para que pueda cambiar su ganancia de acuerdo con la zona donde esté el pH, lo que representará un trabajo continuo de las rutinas de identificación del proceso y de adaptación de los coeficientes del controlador.

La solución es el llamado *control planificado*, en el que conocida la no linealidad del proceso, es decir, las variables correlacionadas con la dinámica del mismo se adaptan los parámetros del controlador en función del punto de operación. En el control por ganancia inversa, la variable a ajustar es la ganancia. Se utiliza un controlador con características opuestas a las del proceso, en el que puedan seleccionarse la anchura de la zona muerta y la pendiente, de tal modo que la ganancia equivalente es:

$$Ganancia\ equivalente = \frac{1}{(ganancia\ dial)\times(pendiente)}$$

Si la pendiente es 1, el controlador pasa a ser lineal.

En la figura 9.66 puede verse la respuesta simulada de un lazo de control de pH sin control planificado, es decir, sin compensación no lineal, ante una disminución de la carga de ácido en el tanque de neutralización. El punto de consigna es 7, el tiempo de residencia es de 20 minutos y el agitador del tanque funciona bien, realizando una buena mezcla de los productos. Se observa que la recuperación del pH por parte del controlador *PI* es muy lenta y viene seguida por un rebasamiento prolongado, provocando un consumo exagerado del reactivo. La ganancia es de sólo 0,16, ya que un mayor valor volvería el proceso inestable.

Aplicando un caracterizador del proceso (inverso de la variación del pH), la recuperación ante la misma disminución de carga de ácido es más rápida, el amortiguamiento más uniforme y la forma de la señal de salida corresponde ahora a un lazo de control de características lineales. El control planificado ha permitido mejorar el comportamiento del lazo de control, aumentando la ganancia del controlador a un valor de 7.

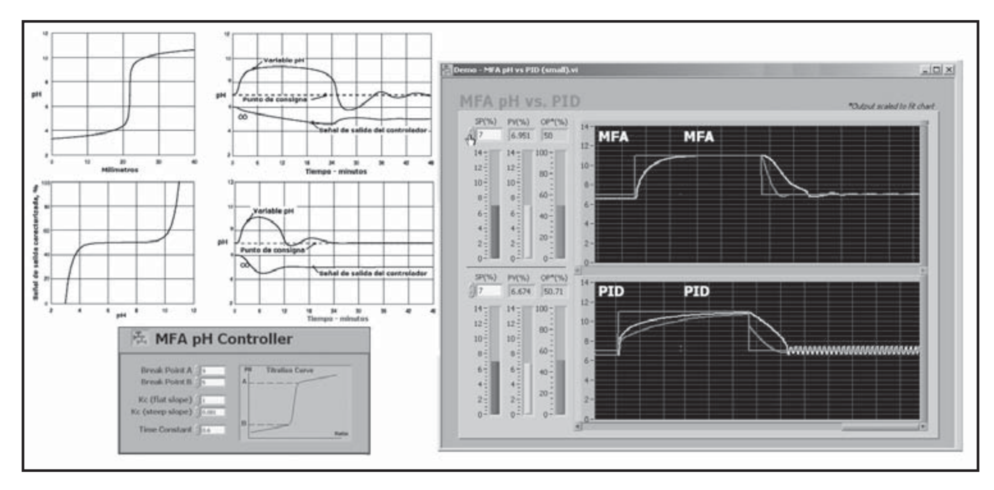


Figura 9.66 Control planificado en un tanque de aguas negras con control de pH. Fuente: ControlSoft y CyboSoft

9.10.10 Instrumentos auxiliares

En el control de procesos es necesario, con frecuencia, transformar o relacionar entre sí las variables medidas para obtener todas las funciones necesarias del sistema de control. Estas relaciones o transformaciones se llevan a cabo en instrumentos llamados "*instrumentos auxiliares*", instalados generalmente detrás del panel de control o en un panel aparte y disponibles en el mercado, tanto en instrumentos neumáticos como en electrónicos. Estas funciones auxiliares son realizadas de forma normal en los controladores digitales, tanto universales como formando parte del control distribuido.

Los relés auxiliares tienen una gran importancia en el control industrial por la gran diversidad de funciones que pueden realizar. Figuran a continuación este tipo de instrumentos, debiendo señalar que en las operaciones realizadas las señales neumáticas y electrónicas tienen un "*cero vivo*" (0,2 bar o 3 psi en neumática y 4 mA c.c. en electrónica) por lo cual, a pesar de que en esta descripción se expongan fórmulas resumidas, es necesario restarles a las señales el valor 0,2 bar (3 psi), o bien 4 mA c.c. y expresarlas como porcentajes del campo de la señal de 1 - 0,2 = 0,8 bar (15 - 3 = 12 psi) en neumática, y de 20 - 4 = 16 mA c.c. en electrónica. Es decir, una señal neumática P apta para el instrumento auxiliar sería:

$$\frac{P-3}{12}$$

Y una señal electrónica I pasaría a ser:

$$\frac{I-4}{16}$$

Extractor de raíz cuadrada utilizado en la linealización de la señal de caudal:

$$P_o = \sqrt{P_1}$$

$$I_o = \sqrt{I_1}$$

Relés sumadores provistos de un factor ajustable K:

$$P_0 = P_1 + P_2 - P_3 \pm K$$

$$I_0 = I_1 + I_2 - I_3 \pm K$$

Bias o suma de una cantidad constante a la señal:

$$P_0 = P_1 \pm K$$

$$I_0 = I_1 \pm K$$

Promedio:

$$P_0 = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

$$I_0 = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

Relés de relación que se emplean en el control de relación de dos variables ya estudiado y que llevan a cabo la siguiente operación (siendo c la constante de la relación):

$$P_0 = cP_1$$

$$I_0 = cI_1$$

Relés multiplicadores o divisores que derivan de los relés de relación sustituyendo la constante por otra señal. La operación general efectuada es:

$$P_0 = \frac{P_1 \times P_3}{P_2}$$

$$I_0 = \frac{I_1 \times I_3}{I_2}$$

Utilizando, pues, esta ecuación para dos señales puede obtenerse una multiplicación o una división.

$$P_0 = P_1 \times P_3$$

$$P_0 = P_1 / P_2$$

$$I_0 = I_1 / I_2$$

O bien, igualando las dos señales $P_1 = P_3$ y haciendo $P_2 = 1$, resulta:

$$P_0 = P_1^2$$

$$I_0 = I_1^2$$

que es el cuadrado de la señal de entrada.

Relé inversor, empleado generalmente en instrumentos electrónicos y que realiza la operación:

$$I_0 = 24 - I_1$$

siendo I_1 la señal de entrada e I_0 la señal invertida.

Por ejemplo, si I_1 = 4 mA c.c., I_0 = 20 mA c.c.; si I_1 = 12 mA c.c., I_0 = 12 mA c.c.

Aislador de señal, utilizado en instrumentos electrónicos y que convierte una señal a otra en la relación 1:1, pero quedando aislados los circuitos electrónicos de ambas señales de entrada y de salida.

Otros instrumentos auxiliares existentes que pueden emplearse en operaciones muy diversas son los siguientes:

- *Convertidor mV a intensidad (mV/I)*, que permite la conversión de la señal procedente de un termopar.
- *Convertidor resistencia a intensidad (R/I)*, que permite la conversión de la señal procedente de una sonda de resistencia o bien de la variación de resistencia de un reóstato final de un controlador eléctrico a señal electrónica.

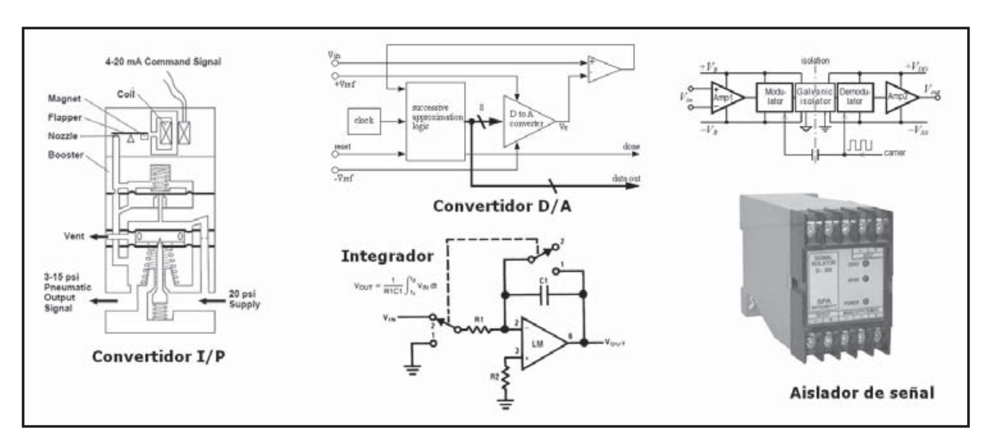


Figura 9.67 Instrumentos auxiliares

- *Convertidor I/P*, que pasa de señal electrónica a señal neumática.
- *Convertidor P/I*, que pasa de señal neumática a señal electrónica.
- *Convertidor mV/P*, que realmente engloba dos instrumentos, el *mV/I* y el *I/P* y pasa, pues, de señal en milivoltios a señal neumática.
- *Convertidor R/P*, que análogamente al anterior pasa de señal de resistencia a señal neumática gracias a dos aparatos, el *R/I* y el *I/P*.
- *Relés de alarma*, ajustados a un valor prefijado de la variable que cierran uno o dos contactos. Pueden ser neumáticos efectuando el disparo entre 3 a 15 psi (0,2 a 1 kg/cm^2), electrónicos, actuando entre 4 y 20 mA c.c., y digitales.
- *Integradores*, empleados generalmente en la totalización de caudal y que pueden ser neumáticos, electrónicos o digitales.

9.11 Seguridad intrínseca y funcional

9.11.1 Introducción

Existen numerosas industrias con atmósferas peligrosas que contienen gases o vapores inflamables y que presentan un riesgo de explosión. Entre las mismas se encuentran químicas, petroquímicas, alimenticia, farmacéutica, minería, plásticos y servicios generales.

Los instrumentos eléctricos y electrónicos instalados en estas atmósferas están obligados a utilizar técnicas especiales de protección que incluyen el aislamiento de la atmósfera explosiva mediante encapsulación “m”, la utilización de material antideflagrante "d" (capaz de confinar una explosión en su interior), la presurización "p" (con purga de aire, impidiendo que la atmósfera pueda entrar dentro del instrumento y/o el empleo de instrumentos neumáticos), el aislante pulverulento "q" en el que se sumerge el material eléctrico bajo tensión, la inmersión en aceite "o" (encapsulándolos para aislarlos de la atmósfera), la seguridad aumentada "o" (adopta medidas para impedir la existencia de cualquier tipo de arco o chispa) y la seguridad intrínseca "i" (admite la existencia de descargas y utiliza un circuito incapaz de producir chispas eléctricas que tengan la suficiente energía para la ignición de la mezcla gas-aire).

La seguridad intrínseca viene definida por la norma ISA-RP12.06.01-2003 (*Part 1: Intrinsic Safety*) como el equipo y cableado que es incapaz de liberar suficiente energía eléctrica o térmica en condiciones normales o anormales, que cause la ignición de una mezcla atmosférica específica peligrosa, en su concentración de más fácil ignición. Es el sistema preferido por el ingeniero de instrumentos, ya que presenta las siguientes ventajas con relación al material antideflagrante:

a) Es preferible evitar una explosión que contenerla.
b) Los avances en los semiconductores permiten realizar operaciones eléctricas complejas en áreas peligrosas a muy baja potencia, del orden de 1 watio.
c) El material antideflagrante sólo lo es si está bien mantenido.
d) El material antideflagrante es pesado, macizo y caro de instalar.
e) El material antideflagrante no puede sacarse de su caja a menos que se ponga fuera de servicio, mientras que el material con seguridad intrínseca, permite la sustitución de elementos estándar y la calibración de los aparatos sin tomar precauciones especiales.

La utilización de material antideflagrante y el uso de las restantes técnicas constituye, usualmente, una solución de compromiso que no es siempre completamente satisfactoria.

9.11.2 Nivel de energía de seguridad y mecanismos de la ignición

La experiencia demuestra que para producir la explosión de una mezcla gaseosa es necesario aportar un nivel crítico de energía, es decir, la explosión sólo se produce si se inyecta suficiente energía a la mezcla como para producir la ignición de un mínimo volumen crítico del material.

El diámetro de una esfera con este volumen recibe el nombre de distancia de extinción y, si la llama incipiente que pueda formarse se mantiene dentro de esta esfera, esta llama naciente no se propaga.

A los niveles de tensión con que trabajan la mayor parte de los instrumentos, la separación entre los electrodos que producen la chispa eléctrica está comprendida dentro de la distancia de extinción. El proceso de la ignición de la mezcla depende de la forma en que se libera la chispa y del tipo de material del electrodo. En cualquier caso, el proceso es complejo y es difícil reproducir exactamente las condiciones de ignición, incluso en el laboratorio.

Pueden existir varias clases de ignición:

a) Cierre de un contacto en un circuito capacitivo

Cuando el contacto cierra el circuito, descarga el condensador, siendo probable que la corriente vaporice una partícula del material cuando los contactos se tocan por primera vez. Este

vapor proporciona un paso para la formación de un arco que se mantiene entre los contactos, al estar éstos muy próximos entre sí. La ignición se produce, pues, con el valor máximo de la distancia de extinción.

b) Apertura de un contacto en un circuito inductivo

Al abrirse el contacto se interrumpe la corriente del circuito inductivo y la energía almacenada en la bobina intenta mantener la circulación de corriente; este fenómeno da lugar a un aumento de tensión entre los contactos separados hasta valores muy altos, del orden de varias veces la tensión de alimentación.

Hay que señalar que, en los circuitos de alta inductancia, la tensión entre contactos es muy alta, favoreciendo el mantenimiento del arco incluso a distancias mayores que la de extinción; en este sentido es más perjudicial un contacto de apertura rápida que otro de movimiento lento. En circuitos de baja inductancia la tensión entre contactos es sensiblemente igual a la tensión de alimentación, con lo cual un contacto de movimiento lento permite, por más tiempo, la persistencia del arco y produce la ignición a niveles de corriente más bajos que el contacto de apertura rápida.

c) Apertura o cierre de un contacto en un circuito resistivo

El arco se inicia por vaporización del material, sea al tocarse los contactos, sea cuando se separan. La distancia de extinción es grande. El efecto es poco importante comparado con la apertura de un contacto en un circuito inductivo.

d) Ignición con superficie o hilos calientes

Es obvio que los instrumentos que trabajan en áreas peligrosas no deben tener sus superficies excesivamente calientes. La Comisión Electrotécnica Internacional (I.E.C.) normalizó seis temperaturas superficiales máximas; la más común es de 45 °C.

Existe posibilidad de ignición en un pequeño hilo calentado, por una corriente elevada. Sin embargo, exceptuando los hilos muy finos, la corriente requerida para provocar la ignición es mayor que la necesaria en la apertura de circuitos resistivos; además, la ignición con hilos de cobre sólo es posible si el hilo funde, o bien si está bobinado; no es posible la ignición en un hilo de cobre recto que no funda. Incluso, cuando el hilo funde, la corriente para la ignición es más alta que la corriente de ignición necesaria en la apertura de un contacto en un circuito resistivo

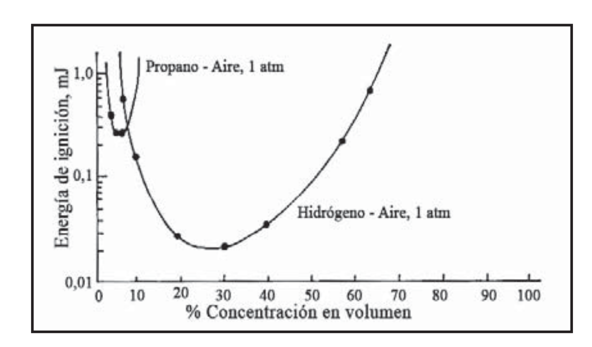


Figura9.68 Efecto de la concentración sobre la energía de ignición

En estos procesos de ignición que se han descrito, juegan un papel importante la distribución, la forma y el material de los electrodos y, además, las características del sistema de encendido del arco.

La energía requerida para la ignición depende de la concentración de la mezcla combustible y existe una concentración para la cual es mínima la energía de ignición. En la figura 9.68 puede verse la influencia de la concentración de la mezcla sobre la energía crítica de ignición en dos tipos de mezclas: propano-aire e hidrógeno-aire.

En la figura 9.69 pueden verse las curvas tensión-capacidad, intensidad-inductancia y tensión-corriente en circuitos capacitivo, inductivo y resistivo respectivamente, determinadas empleando los instrumentos de ensayo recomendados en la publicación 79-3 de la Comisión Electrotécnica Internacional.

Las curvas presentadas representan valores de corriente o de tensión que pueden provocar la ignición de la mezcla con la probabilidad de una vez en mil veces. Además, estas curvas se determinan en condiciones de laboratorio, utilizando mezclas de más fácil ignición y con contactos eléctricos dispuestos y mantenidos para favorecer la ignición. Incluso la seguridad viene aumentada utilizando factores, de los cuales el más común es 1,5. Así pues, la seguridad en el término seguridad intrínseca es inherente a los datos básicos de ignición.

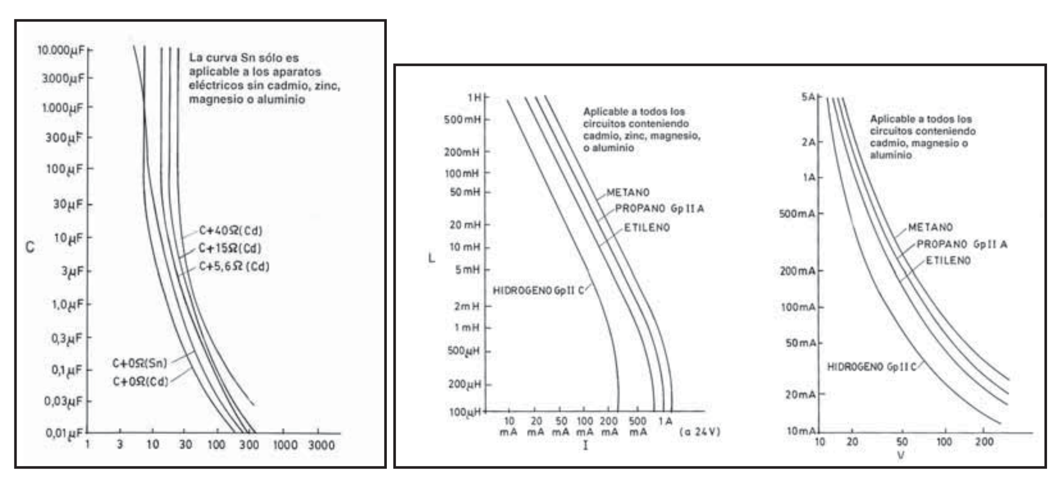


Figura 9.69 Energía mínima de ignición (MIE) en circuitos capacitivo, inductivo y resistivo (norma EN 50020)

La energía mínima de ignición (MIE = *Minimum Ignition Energy*) es, esencialmente, independiente de la naturaleza de los electrodos. A valores inferiores a la energía mínima de ignición (MIE) no puede presentarse la ignición de la mezcla debido a la baja cantidad de combustible. Este valor se denomina límite inferior de explosión (LEL = *Lowest Explosive Limit*). A medida que crece la proporción de combustible se precisa mayor energía para la ignición de la mezcla, de modo que a partir de un límite, llamado límite superior de explosión (UEL = *Upper Explosive Limit*) es imposible la ignición. En la tabla 9.4 se encuentran los valores correspondientes al hidrógeno y al propano.

La *temperatura mínima de ignición* de una mezcla aire/gas es aquella en la que la mezcla se enciende sin aporte de energía eléctrica.

El *punto de inflamación* es una característica de un líquido volátil definida como la temperatura más baja a la cual el líquido libera suficientes vapores para su ignición en presencia de una fuente energética.

Los instrumentos situados normalmente en áreas peligrosas son muy variados: interruptores, termopares, convertidores *I/P*, transmisores, sondas de resistencia, LED, válvulas de solenoide, galgas extensiométricos, potenciómetros, alarmas, bus de comunicaciones, detectores de llama, etc.

Gases	Energía mínima de ignición (MIE)	Límite inferior de explosión (LEL)	Límite superior de explosión (UEL)
Hidrógeno	20 microjoules	4%	75%
Propano	180 microjoules	2%	9,50%

Tabla 9.4 Energía liberada en un circuito eléctrico en fallo

Por otro lado, no puede afirmarse que el circuito sea intrínsecamente seguro con la única base de unos ensayos de ignición satisfactorios. También se hace preciso asegurarse que la construcción y la disposición de los instrumentos sea tal que, durante su vida útil, no se presenten problemas de envejecimiento que puedan dar lugar a la pérdida de seguridad.

Los organismos correspondientes examinan, pues, físicamente los instrumentos a base de emitir el certificado de seguridad intrínseca.

9.11.3 Clasificaciones de áreas peligrosas

Área peligrosa es aquella en la que pueden estar presentes gases o vapores inflamables o polvos altamente combustibles en cantidad suficiente para provocar la ignición de la mezcla.

	Clasificación por Zonas	Clasificación por Clases, Divisiones y Grupos
Tipo de peligro	Mezclas explosivas de aire con gases o vapores inflamables. Grupo I: Minas donde puede estar presente el metano. Grupo II: Lugares con atmósferas potencialmente explosivas distintas de las minas y susceptibles al metano.	Mezclas explosivas de aire con: Clase I - gases o vapores. Clase II - polvos: Clase III - fibras o insectos.
Grado del peligro	Zona 0: Mezcla explosiva aire/gas presente continuamente o durante largos periodos. Zona 1: Mezcla explosiva aire/gas existente probablemente en condiciones normales de operación en cortos periodos.	División 1: Concentración explosiva de material peligroso existente de forma continua, intermitente o periódicamente en condiciones normales de operación.
	Zona 2: Mezcla explosiva aire/gas que no es probable que esté presente en condiciones normales de operación y si existe es solo durante cortos periodos de tiempo.	División 2: Concentración explosiva de material peligroso presente solo en condiciones de fallo del proceso y si tal condición ocurre solo lo es durante cortos periodos de tiempo.
Ignición por chispa	Los gases explosivos se agrupan de acuerdo con sus capacidades de ignición. Los gases representativos son: Grupo I: metano; Grupo IIC: hidrógeno y acetileno; Grupo IIB: etileno; Grupo IIA; propano.	Las atmósferas explosivas se agrupan de acuerdo con sus capacidades de ignición. Grupo A: acetileno; Grupo B: hidrógeno; Grupo C: etileno; Grupo D: propano; Grupo E: polvo metálico; Grupo F: polvo de carbón; Grupo G: harina, almidón y grano en polvo.
Ignición por superficie caliente	Los aparatos de áreas peligrosas se clasifican de acuerdo con la temperatura máxima de la superficie producida en condiciones de fallo y a la temperatura ambiente de 40 °C (u otra especificada). T1: 450 °C T2: 300 °C T2A*: 280 °C T2B*: 260 °C T2C*: 230 °C T2D*: 215 °C T3: 200 °C T3A*: 180 °C T3B*: 165 °C T3C*: 160 °C T4: 135 °C T4A*: 120 °C T5: 100 °C T6: 85 °C. *Solo Norteamérica.	
Características del gas	La información sobre la agrupación de gases por energía de ignición y temperaturas de ignición se encuentra en: *NFPA 497M, Manual for Classification of Gases, Vapors and Dusts for Electrical Equipment in Hazardous (Classified) Locations CSA No. C22-1-NEC Article 500 British Standard Code of Practice for Electrical Apparatus and Associated Equipment for use in Explosive Atmospheres (other than Mining Application), BS5345: Part 1 - Basic requirements for all parts of the code.*	

Tabla 9.5 Equivalencia entre clasificaciones de Zonas y Clases, Divisiones y Grupos. Fuente: STI

Los organismos que desarrollan normas relacionadas con la seguridad intrínseca son CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*) en Europa, NFPA (*National Fire Protection Agency*), CSA (*Canadian Standards Association*), UL (*Underwriters Laboratories*), FM (*Factory Mutual*),

NEC (*National Electric Code*) y la ISA (*Instrument Society of Measurement and Control*) en Estados Unidos y Canada. En España se utiliza el *Reglamento Electrotécnico para baja tensión*.

Si bien Estados Unidos y Canada clasificaban las áreas peligrosas por Clases, Divisiones y Grupos, actualmente están iniciando la clasificación por Zonas, de forma análoga a las clasificaciones de la IEC (*International Electrotechnical Comisión*) y CENELEC. En la tabla 9.5 puede verse la equivalencia entre estas dos clasificaciones.

El coeficiente de seguridad para un circuito inductivo es:

Corriente máxima (según Norma EN 50020) / Corriente real

Y, para un circuito capacitivo, es:

Tensión máxima permitida / Tensión real

La clasificación de NEMA del equipo eléctrico es la que aparece en la tabla 9.6.

Tipo	Protección	Descripción
I	Uso general	Usado en condiciones atmosféricas normales y en interiores.
II	A prueba de humedad	Similar al tipo I pero protegido contra condensaciones.
III	Resistente al ambiente	Protege contra la lluvia. Para exteriores.
IV	A prueba de agua	Resiste el chorro de una tobera de 25 mm a la distancia no menor de 3 m con un caudal de 247 l/min de agua y durante 5 minutos. Para exteriores.
V	A prueba de polvo	Provisto de empaquetaduras contra el polvo. Para acererías y cementeras.
VI	Sumergible	Para inmersión en agua, minas, etc. El diseño depende de las condiciones de presión y del tiempo de inmersión.
VII	A prueba de explosión	Cumple los requerimientos de la Clase I, las especificaciones de Underwriters Laboratories, Inc. Atmósferas con gasolina, hexano, butano, propano, acetona, benzol, lacas y gas natural.
Tipo 8	A prueba de explosión, inmerso en aceite	Lugares clasificados domo Clase I, Grupos A, B y C.
Tipo 9	A prueba de explosión, y de ignición de polvo	Para interiores clasificados como Clase II, Grupos E, F o G.
IX	A prueba de explosión de polvo combustible	Cumple los requerimientos de la Clase II, las especificaciones de Underwriters Laboratories Inc. Utilizado en atmósferas con polvos metálicos, carbón, harina, almidón o grano en polvo.

Tabla 9.6 Clasificación NEMA de equipo eléctrico

9.11.4 Normas

Entre los instrumentos provistos de seguridad intrínseca figuran: transmisores de dos hilos de 4-20 mA c.c., termopares, sondas de resistencia, galgas extensiométricos, interruptores de presión, caudal y nivel, convertidores *I/P*, válvulas de solenoide, interruptores de proximidad, sensores de temperatura infrarrojos, medidores de caudal magnéticos, potenciómetros e indicadores LED.

Se utilizan las normas de España, Canadá, Alemania, Reino Unido y los Estados Unidos. Para que cualquier circuito o aparato cumpla estas normas, y pueda disponer del correspondiente certificado, es necesario enviarlo a los correspondientes organismos indicados en las normas:

- *Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión* (REBT).
- Norma Española *MIE BT 026 Prescripciones para las instalaciones eléctricas de emplazamiento con riesgo de incendio o explosión (*modificada en 1992). Orden 16-9-2002 (nueva legislación).

- *ITC-BT-29 Prescripciones particulares para las instalaciones eléctricas de los locales con riesgo de incendio o explosión*.
- R.D. 681/2003 (ATEX 137) *Definición de áreas en las que pueden formarse atmósferas explosivas*.
- Norma alemana, *Verband Deutscher Elektrotechniker (V.D.E.) 0171*, que es la especificación para la fabricación y ensayo de todos los aparatos eléctricos a emplear en atmósferas de gas explosivas en otras industrias que en la minería. El organismo de ensayo y certificación es el *Physikalisch Technische Bundesanstalt* (P. T. B.).
- Norma americana ANSI/ISA *S12-99 - Installation of Intrinsicaly Safe Systems for Hazardous Classified Locations de I.S.A. (Instrument Society of America)* del año 1999.
- Norma Americana ANSI/ISA *RP12.06.01-2003 Prácticas recomendadas para el cableado en lugares peligrosos. Parte 1: Seguridad intrínseca*.
- Norma americana *NFPA 497 2008 Prácticas recomendadas para la clasificación de líquidos, gases o vapores inflamables y lugares peligrosos (clasificados) para instalaciones eléctricas en áreas de procesos químicos (National Fire Prevention Association - N.F.P.A.)*.
- Norma americana *NEC 2008 (National Electric Code)*.
- *ANSI/NFPA 70 (NEC)*, artículo 500 a 505, que clasifica las áreas en zonas (antes las clasificaba en División 1 y División 2). Los circuitos antideflagrantes están permitidos en la División 2, Zona 2, mientras que los circuitos de seguridad intrínseca son adecuados en División 1 y 2 y en las Zonas 0, 1 y 2. La diferencia principal es que los circuitos antideflagrantes se evalúan en cuanto a su capacidad de ignición, mientras que los de seguridad intrínseca se evalúan en condiciones de fallo.
- Norma canadiense *C22.1-1990 de la Canadian Standards Association (C.S.A.*) sobre requerimientos de seguridad en instalaciones eléctricas.
- Norma Europea *BS EN 50020:2002* (o CENELEC EN 60079-10 - Comité Europeo de Normalización Electrotécnica).

Aparatos eléctricos en atmósferas potencialmente explosivas. Seguridad intrínseca. Clasificación de emplazamientos con riesgo de explosión debido a la presencia de gases, vapores y nieblas inflamables.

- Norma *IEC-79* sobre aparatos eléctricos para atmósferas explosivas de la *International Electrotechnical Commission* (1993).
- FISCO - *Fieldbus nonincendive concept* - Concepto de material antideflagrante en el bus de comunicaciones.
- FNICO - *Fieldbus nonincendive concept* - Concepto de material antideflagrante en el bus de comunicaciones limitado a la zona 2.

9.11.5 Barreras Zener

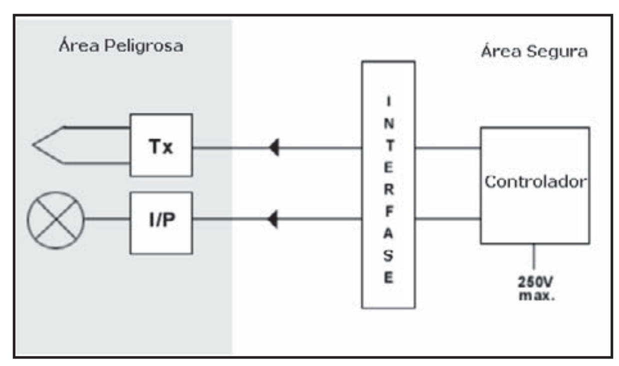
En cualquier sistema de seguridad intrínseca es necesario impedir que las corrientes o tensiones de los circuitos situados en la zona peligrosa puedan sobrepasar los niveles de seguridad predeterminados.

En el circuito de alimentación debe impedirse la entrada de tensiones en la red que puedan afectar un circuito situado en el área peligrosa.

En algunos aparatos existe un aislamiento mecánico suficiente entre los cables de potencia y los de señal. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, el equipo está alimentado a través de un transformador; una práctica ampliamente aceptada es disponer de una pantalla puesta a masa entre los arrollamientos primario y secundario y que los hilos estén colocados de tal forma que no puedan presentarse cortocircuitos.

A menudo, los equipos situados en las áreas seguras están sometidos a tensiones tan altas que, ante cualquier fallo, pueden comunicarlas a los hilos de campo. Éstos se vuelven peligrosos y para evitarlo se instalan elementos limitadores que reducen los valores de tensión y de corriente a niveles seguros tan pronto se presenta un fallo. En la figura 9.70 puede verse el empleo de una barrera Zener y de resistencias R de limitación de corriente suministrada al arrollamiento de campo.

La barrera Zener está proyectada para soportar una tensión de cresta de 365 V, de una fuente de impedancia nula situada en el área segura. En el circuito puede verse que, en caso de defectos en el equipo, la tensión de alimentación de éstos queda aplicada a la entrada de la barrera (bornes 1 y 2). Los diodos entran en conducción, limitando la tensión en la zona peligrosa (bornes 3 y 4) hasta que el fusible se funde, en cuyo caso, la barrera Zener debe ser sustituida.



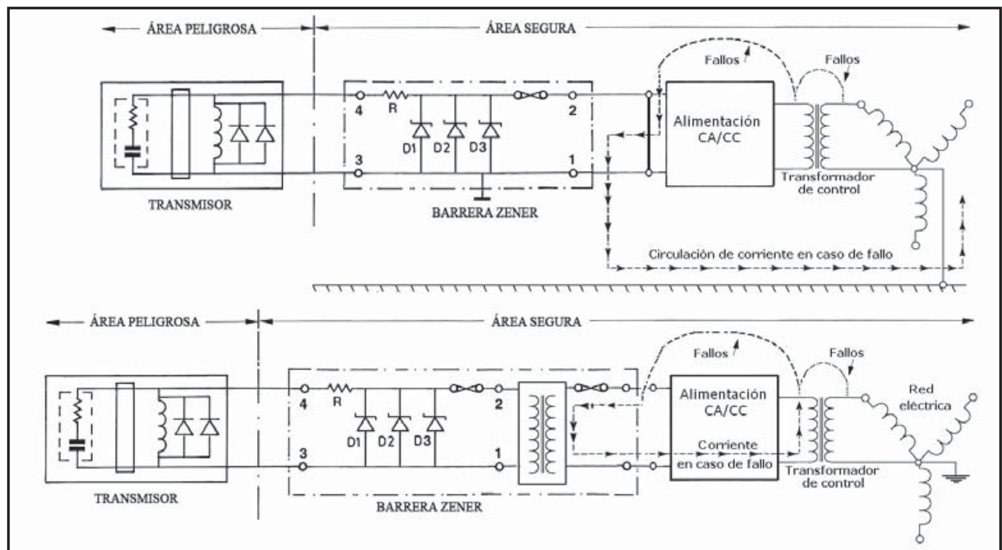


Figura 9.70 Barreras Zener normal y con transformador de aislamiento

Los diodos Zener limitan la tensión que puede aparecer en bornes de la barrera. La puesta a tierra exige una baja resistencia (< 1 Ω), la conexión de la barrera en un punto y un buen mantenimiento. Por consiguiente, la barrera Zener limita la energía capaz de pasar al área peligrosa a un valor seguro y bajo condiciones de fallo severo.

En la norma ANSI/UL 9133 (*Normas para seguridad de aparatos con seguridad intrínseca y asociados para su uso en lugares peligrosos clasificados Clase I, II, y III, División 1*) se encuentran los valores estándar de la capacitancia e inductancia del cable de conexión entre el instrumento y la barrera Zener (60 pF/pie para la capacitancia y 0,2 mH/pie para la inductancia).

Uno de los inconvenientes de la barrera Zener es que debe ser conectada a una tierra con seguridad intrínseca, con el fin de mantener el fallo en el área segura sin que penetre en el área peligrosa. Incorporando al circuito un transformador de aislamiento no se requiere una conexión a tierra con seguridad intrínseca, ya que el propio transformador aísla las conexiones del área peligrosa de la no peligrosa.

Otras ventajas del circuito con transformador de aislamiento, representado en la figura 9.70, son:

- No son necesarias fuentes de alimentación estabilizada.
- Los lazos de control con señales en miliamperios o milivoltios permanecen flotantes, mientras que la barrera Zener clásica conecta un hilo de la señal a tierra.
- Los transformadores de aislamiento pueden repararse, al contrario de las barreras Zener que están encapsuladas.
- Los transformadores contienen un circuito limitante de corriente que impide que el fusible de la barrera Zener se funda en el caso de una condición de cortocircuito.

La aprobación oficial de las barreras se realiza, bien examinando instrumentos de campo con barreras específicas, o bien evaluando separadamente cada pieza del equipo para darle un conjunto de parámetros. En este caso, los parámetros de los instrumentos del área peligrosa son:

Área peligrosa (V_{max}, I_{max}, C_i, L_i)		**Área segura (V_{oc}, I_{sc}, C_a, L_a)**
Tensión tolerable en fallo (V_{max})	≥	Tensión de fallo (V_{oc})
Intensidad tolerable en fallo (I_{max})	≥	Corriente de fallo (I_{sc})
Capacidad interna sin proteger (C_i)	≤	Capacidad permitida (C_a)
Inductancia interna sin proteger (L_i)	≤	Inductancia permitida (L_a)

9.11.6 Barreras galvánicas

Las barreras Zener tienen el inconveniente de producir una caída de tensión y precisar una conexión a tierra o bien un transformador de aislamiento, cuyo coste puede ser elevado. Las barreras galvánicas, representadas en la figura 9.71 no requieren de toma de tierra y carecen de conexión eléctrica entre la entrada y la salida, mientras que sí existe esta conexión en las barreras Zener. Las barreras galvánicas proporcionan una alimentación flotante con respecto a tierra y suministran la misma señal del transmisor gracias a un optoacoplador.

9.11.7 Factores de seguridad

La probabilidad de que un sistema de seguridad intrínseca dé lugar a una explosión es casi despreciable. Figuran, a continuación, las probabilidades de que ocurran varios tipos de fallos:

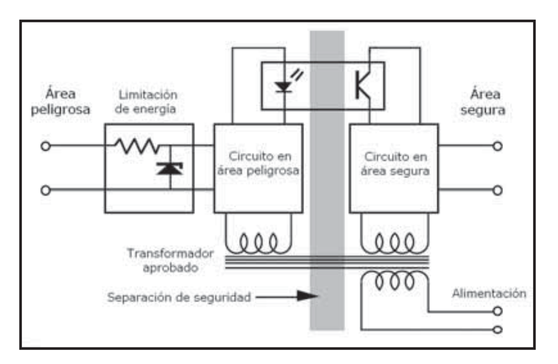


Figura 9.71 Barrera galvánica. Fuente: Honeywell

1. Ocurre un fallo y permanece intermitente durante 1 hora en 1000 horas . . . . . . 10^{-3}
2. Fallo de un componente crítico de un total de 100 en el lazo de control . . . . 10^{-2}
3. El hilo de campo se rompe o se pone a masa con una chispa (1 hora/año) . . . . . 10^{-4}
4. Área de rotura próxima a la mezcla concentrada de más fácil ignición . . . . 10^{-2}

Con la probabilidad de 10^{-11} de que ocurra una explosión, el equipo se certifica considerando un factor adicional de seguridad de 1,5 con respecto a condiciones que tienen solamente la probabilidad de ignición 10^{-2} bajo condiciones ideales.

9.11.8 Seguridad funcional de los instrumentos

El concepto de seguridad de los instrumentos engloba la llamada seguridad funcional durante el ciclo de vida del instrumento, es decir, especifica el *Nivel de Integridad de la Seguridad* (SIL = *Safety Integrity Level*) que define, en función del posible impacto de un fallo sobre personas y bienes y su probabilidad, el nivel de seguridad requerido del sistema y, por tanto, de todos sus componentes.

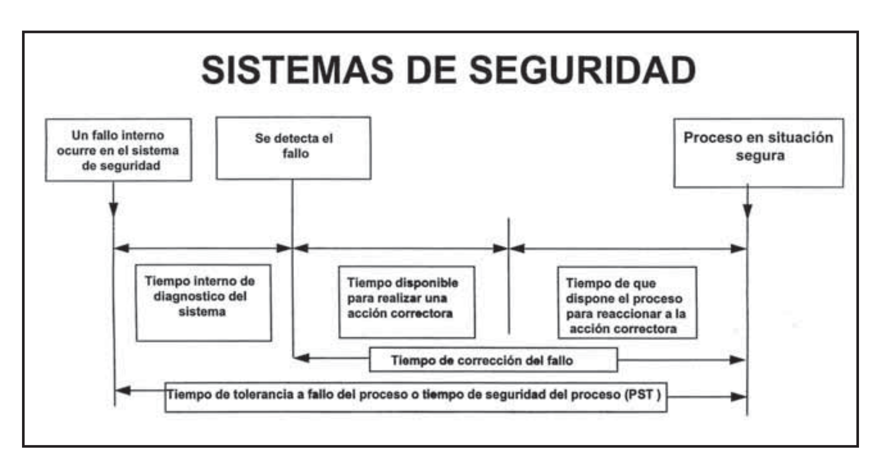


Figura 9.72 Acciones a tomar para mantener el nivel de seguridad

Los sistemas de seguridad tienden a que el *tiempo de tolerancia a fallo del proceso o tiempo de seguridad del proceso PST* (*Process Safety Time*) no sea superado, cuando un fallo ocurre en el

proceso o en el sistema de seguridad, porque en caso contrario, el proceso pasaría a una situación no segura (figura 9.72).

Las normas que definen los riesgos son:

- *DIN VDE 0801* (año 1989). Define el *Nivel de Riesgo de la Aplicación*.
- *DIN VDE 19250* (año 1989). Define los requisitos de los *Sistemas de Seguridad* para cumplir las especificaciones *DIN VDE 0801*.
- *IEC 61508*. Define los niveles de riesgo de las aplicaciones y los requisitos que deben cumplir los sistemas de control adecuados a cada nivel (figura 9.73).
- *IEC 61511*. *Sistemas de seguridad funcional de instrumentos en los procesos industriales.*
- *ANSI/ISA 84.01-1996*. Define los requisitos para *Sistemas de Seguridad*, es decir, la designación y verificación del *Nivel de Integridad de la Seguridad* (SIL) de un *Sistema de Seguridad* (SIS). Detecta las situaciones de peligro potencial de un proceso y actúa para llevar el proceso al estado seguro.

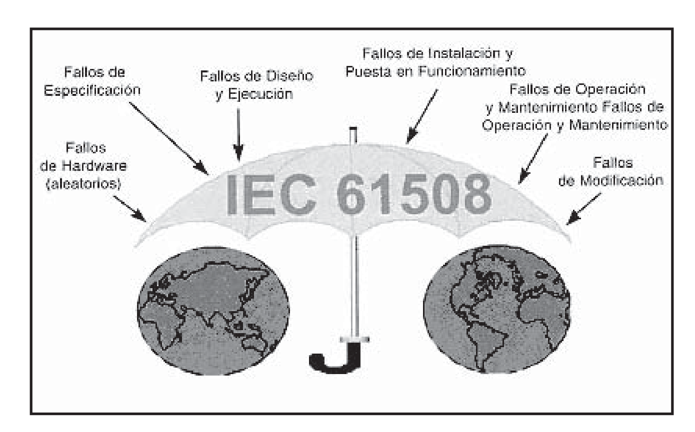


Figura 9.73 Norma IEC 61508 (la norma 61511 se refiere a los procesos industriales)

Cuanto más alto es el SIL, mayor ha de ser el nivel de protección y a la inversa, cuanto más bajo sea, menor será la protección instalada. Por ejemplo, un SIL 1 en un tanque con alarma de nivel alto indica que el riesgo aceptado frente a paradas falsas es pequeño, del orden del 10% lo que conlleva una disponibilidad del 90%. Es decir, de cada 10 veces que el nivel esté alto, el sistema de seguridad (alarma de nivel y enclavamiento con la bomba de vaciado del tanque) fallará una vez y el tanque se desbordará.

No existen reglamentaciones que asignen un nivel SIL a un proceso en particular, por lo que su asignación es una decisión corporativa basada en una filosofía de gestión de riesgos y de su tolerancia. El SIL está relacionado con la *probabilidad media de fallo a la demanda por año* (PFDavg).

Existe una relación entre la seguridad y la disponibilidad. El sistema de seguridad no debe parar el proceso ante fallos internos (paradas falsas) pues afectaría la disponibilidad, y la probabilidad de una parada del proceso no deseada debe ser baja para no afectar la disponibilidad, lo cual repercutiría en la economía del proceso.

La relación entre el *Nivel de Integridad de la Seguridad* (SIL) y la *probabilidad de fallo a la demanda* (PFD) puede verse en la tabla 9.7.

SIL	IEC 61508	ISA S84.01	PFD - Baja demanda (Probabilidad de fallo)	PFD - Alta demanda (Probabilidad de fallo)	Disponibilidad	1/PFD	Impacto sobre personal
					(1-PFD)	Tiempo medio entre fallos	
4	Sí	No	$\geq 10^{-5}$ a $<10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ a $<10^{-8}$	>99,9%	100.000 a 10.000	Impacto catastrófico
3	Sí	Si	$\geq 10^{-4}$ a $<10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ a $<10^{-7}$	99,90 - 99,99%	10.000 a 1.000	Protección a personal
2	Sí	Si	$\geq 10^{-3}$ a $<10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ a $<10^{-6}$	99,00 - 99,90%	1.000 a 100	Protección importante
1	Sí	Si	$\geq 10^{-2}$ a $<10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ a $<10^{-5}$	90,00 - 99,00%	100 a 10	Protección pequeña

Tabla 9.7 Correlación entre SIL y PFD

El valor cualitativo del SIL puede expresarse como una consecuencia de los *fallos en el sistema de seguridad* (SIS), en términos de daños a personas e instalaciones.

SIL	Consecuencias	Interpretación
4	Impacto catastrófico (catastrófico)	Intolerable. Muerte de una o más personas. Pérdidas de producción y de capital mayores de 10 millones €.
3	Impacto en personas y en la comunidad (crítico)	Indeseable. Muerte de una persona y lesiones múltiples a la comunidad. Pérdidas de producción y de capital entre 1 millón € y 10 millones €. Solo debe aceptarse si la reducción del riesgo es impracticable.
2	Daños importantes en la producción y en la propiedad. Posibles lesiones a personas que requieren hospitalización (marginal)	Tolerable con el apoyo responsable del Comité de Seguridad. Pérdidas de producción y de capital entre 50.000 y 1 millón de €.
1	Daños poco importantes en personas y en instalaciones (despreciable)	Tolerable con el respaldo del Comité de Seguridad a las revisiones normales de los proyectos Lesiones de escasa gravedad. Sin daños en el medio ambiente. Pérdidas de producción menores de 50.000 €.

Tabla 9.8 Valor cualitativo del SIL

La norma IEC 61508 y la 61511 proporcionan un gráfico de riesgo, contemplado desde el punto de vista de la persona que está expuesta en la zona del incidente, que utiliza cuatro tipos de parámetros:

1. Consecuencia (S).
2. Frecuencia de exposición (A).
3. Posibilidad de escape del evento peligroso (G).
4. Probabilidad del evento (W).

El riesgo cuantitativo es la valoración realizada con índices de fallos (humanos & hardware) y, en algunos casos, se evalúa el impacto potencial. En el caso de que el SIL calculado sea inferior o igual al SIL objetivo, es necesario aplicar al proceso, bien una mejor tecnología, o bien una mayor redundancia.

A continuación tiene lugar una revisión del SIL con el objeto de detectar errores u omisiones en las hipótesis. El riesgo para el usuario es que si sobredimensiona el sistema de seguridad le resultará caro y al contrario si el diseño es insuficiente, se expone a un riesgo excesivo y a la producción de incidentes en el proceso. Por ejemplo, si la probabilidad del fallo a la demanda es de 0,0006, resulta el valor de SIL = 2. Si el SIL objetivo fuera 3 habría que revisar el proceso.

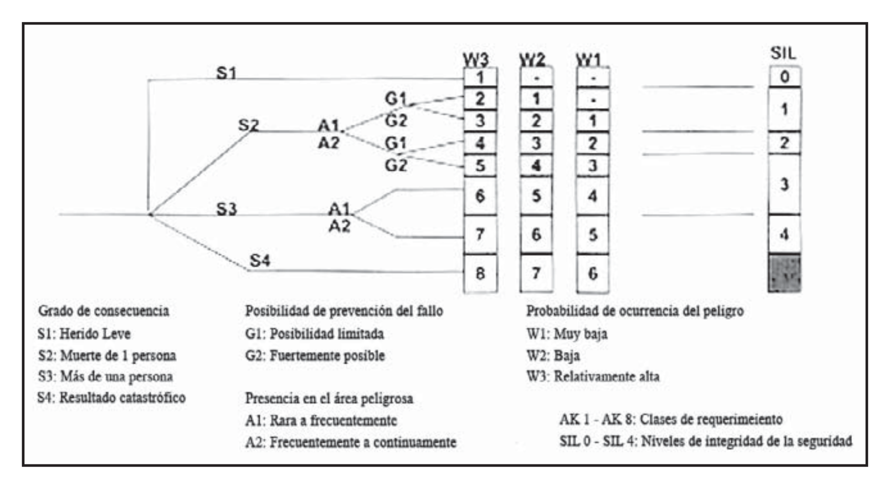


Figura 9.74 Clasificación de seguridad DIN VDE 19250 y IEC 61508 (matriz de riesgo)

Un sistema de seguridad (SIS) típico utiliza controladores programables (PLC = *Programable Logic Control*) de seguridad preparados para no fallar (tolerantes a fallo – *Fault Tolerant*) y si fallan deben actuar de forma predecible y segura (*fail-safe*).

Los principios de exclusión o tolerancias a fallo son:

- *1oo1* (uno de uno - *one out of one*) que utiliza un sistema de canal simple. Un fallo se traduce en la pérdida de la función de seguridad y en la parada forzosa del proceso. Si dispone de diagnóstico automático de fallos se designa *1oo1D*.
- *1oo2* (uno de dos - *one out of two*). Si un canal falla, el otro realiza la función de seguridad. Sin embargo, la probabilidad de fallo falso se duplica.
- *2oo2* (dos de dos - *two out of two*). Se reduce la probabilidad del fallo falso pero se duplica la probabilidad de fallo a la demanda.
- *2oo3* (TMR - *Triple Modular Redundant - two out of three*). Existen tres canales de los que dos funcionan bien para realizar las funciones de seguridad, por lo que son tolerantes a un fallo.
- *1oo2D* (*one out of two* + diagnóstico automático de fallos). *1oo2* es excelente con respecto a la seguridad pero no es tolerante a fallos respecto a la disponibilidad. En la *1oo2D*, un único fallo detectado no conlleva la pérdida de la seguridad o la parada del proceso, puesto que, aislado el canal afectado, el canal sano continuará la operación.
- *2oo4D* (QMR - *Quadruple Modular Redundant - two out of four* + diagnóstico automático de fallos). Es tolerante a dos fallos para la integridad de la seguridad y a un fallo respecto a la disponibilidad del sistema.

En la figura 9.75 pueden verse este tipo de PLC.

Entre los organismos que certifican los sistemas de seguridad se encuentran FM (*Factory Mutual Research*) y la TÜV alemana.

En la tabla 9.9 pueden verse los valores de λ_d de los transmisores (tasa de fallos montaje 2oo3), los valores de λ_d de las válvulas de bloqueo (tasa de fallos montaje 1oo2), las fórmulas que se aplican para determinar PFD y el PFD final (suma de los anteriores), que equivale a SIL 3.

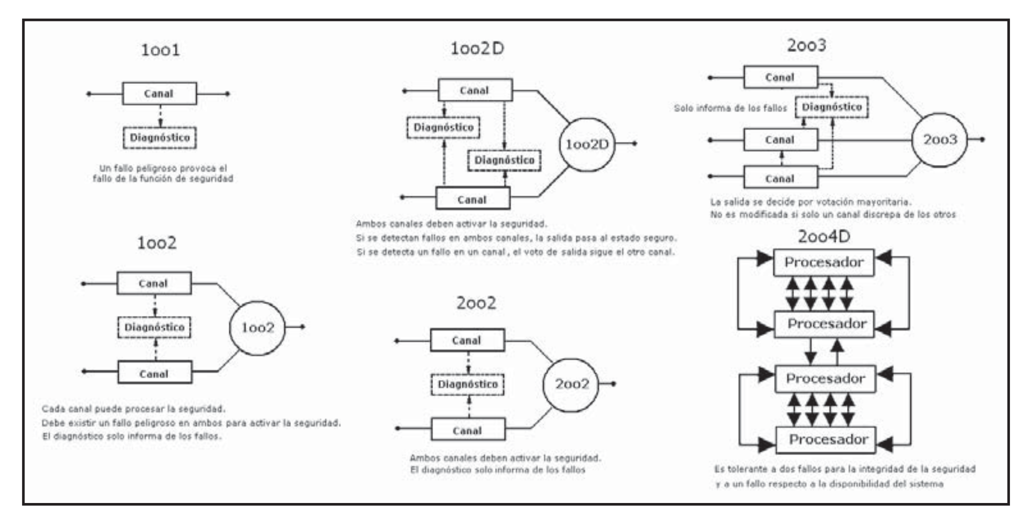


Figura 9.75 *Arquitecturas de PLC de seguridad*

Instrumentos	Probabilidad de fallo	TI (horas - tiempo ensayo)	Fórmula PFD	PFD
Transmisor presión	0,00000228	4.380	$(\lambda_d{*}TI)^2$	0,0001
Transmisor temperatura	0,00000285	4.380	$(\lambda_d{*}TI)^2$	0,000156
Controlador	0,00000228	4.380		0,00002
Válvula de bloqueo	0,00002	4.380	$1/3\ (\lambda_d{*}TI)^2$	0,0000333
Sistema de seguridad de alivio			Suma	0,000309

Tabla 9.9 *Valores de probabilidades de fallo a la demanda de sistemas*

9.12 Control por ordenador

9.12.1 Generalidades

Hoy en día, con el aumento del tamaño del proceso y el crecimiento de su complejidad, llega a ser necesario obtener su óptimo control para conseguir una marcha más perfecta de la planta y lograr los beneficios adicionales que ello comporta.

El ordenador digital está basado en microprocesadores y es ideal para la solución de los problemas numéricos, y su alta velocidad permite realizar el control de forma prácticamente continua, a pesar de que las variables de proceso son muestreadas con un tiempo entre 2 a 120 segundos, a través de algoritmos *PID* y de control avanzado.

Presenta las siguientes ventajas:

- Mayor rendimiento del proceso y, por lo tanto, una gran producción con menores costes gracias a la utilización eficiente del material y del equipo.
- Mayor calidad en los productos fabricados.
- Mayor seguridad, ya que la acción de corrección y la activación de alarmas es inmediata.

- Proporciona una gran cantidad de información a la dirección que, bien seleccionada y presentada, permite el seguimiento en tiempo real de la marcha total de la planta. Entre las mismas se encuentra:
    - Monitorización. Histórico de variables y generación de informes.
    - Tratamiento de alarmas.
    - Supervisión.

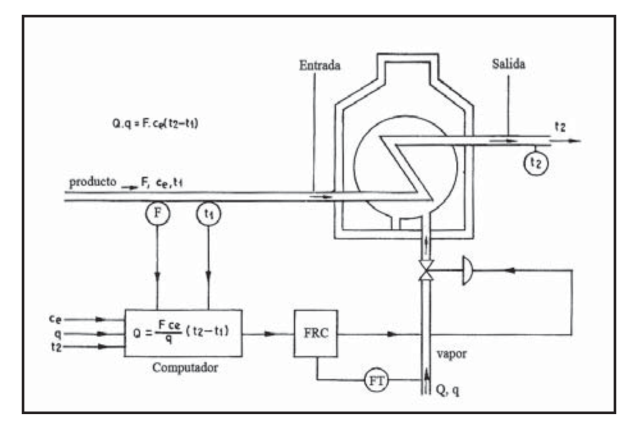


Figura 9.76 Control de un intercambiador de calor

La optimización idónea se consigue desarrollando un modelo que refleje, exactamente, el sistema de balance de energía y de materiales. Esto puede verse, de forma sencilla, en el intercambiador de calor de la figura 9.76. La ecuación que representa el balance de energía es:

$$Q \times q = F \times c_e \times (t_2 - t_1)$$

en la que:

Q = caudal de vapor

q = calor de condensación del vapor a la presión de alimentación

F = caudal de líquido

c_e = calor específico del líquido

t_1 = temperatura del líquido a la entrada

t_2 = temperatura del líquido a la salida

Se supone que no hay pérdidas o que éstas son despreciables. Esta ecuación es el modelo matemático simple del proceso, expresado en forma estática, sin tener en cuenta las condiciones dinámicas (en cuyo caso estaría expresada en forma de ecuación diferencial). Como interesa controlar la temperatura de salida, ésta es:

$$t_2 = t_1 + \frac{Q \times q}{F \times c_e}$$

En el control clásico por realimentación de t_2, se actúa únicamente sobre el caudal de vapor Q, mientras que en el control anticipativo se considera sólo el caudal del producto F. De aquí, la importancia

de tener en cuenta las demás variables que intervienen en la ecuación para conseguir el control total del proceso. Por otro lado, la ecuación puede pasarse a:

$$Q = F \times \frac{c_e}{q} \times (t_2 - t_1)$$

Expresión que indica que el problema del control total queda resuelto con un instrumento (ordenador o computador) que resuelva la ecuación anterior, midiendo las variables t_1, t_2 y F e introduciendo o midiendo también los valores de c_e y q. La eficacia del ordenador dependerá de la exactitud con que el modelo matemático o algoritmo de control se ajuste al modelo real del proceso, por lo que se aconseja añadir al sistema un control de realimentación clásico que, naturalmente, puede estar también incluido en el computador.

El ejemplo expuesto es muy simple. Como es lógico, al tender los sistemas a evolucionar hacia una complejidad cada vez mayor, fue inevitable intentar desarrollar un computador de gran capacidad que realizara la función de controlar todas las variables del proceso de una forma óptima. Este computador programable y para usos generales evolucionó en dos etapas: el control digital directo y el control supervisor.

Estos computadores iniciaron la separación de la instrumentación analógica del mando directo del operador, pasando éste, gradualmente, a funciones de supervisión e interviniendo sólo en caso necesario al ser avisado por el computador. Los costes de implantación de un control por ordenador que eran muy elevados hace unos 50 años, se han abaratado enormemente y las prestaciones han mejorado espectacularmente, de modo que puede afirmarse que es más barata y de mas interés (por la información histórica que proporcionan) la adquisición de instrumentos de control digital que la de analógicos (neumáticos o electrónicos).

Generalizando el ejemplo sencillo del intercambiador de calor, un proceso general tal como el de una planta petroquímica, incluye:

1. Medida de las variables de proceso importantes (presión, caudal, temperatura, etc.).
2. Estrategia de optimización de las variables finales e importantes del proceso.
3. Elementos finales de control que permiten la optimización (válvulas, interruptores, motores, bombas, etc.).
4. Generación de informes a dirección del estado del equipo y de las cifras y de la calidad de la producción de bienes finales.

Si la planta produce 20 productos puede estar dividida en tres áreas de fabricación, cada una con sus unidades de procesamiento químico y con varios ordenadores que se encargan, cada uno, de unos 400 lazos de control que engloban un total de 2.000 variables de proceso (presión, caudal, nivel, temperatura, concentración, etc.).

Las variables de proceso son muestreadas con un tiempo entre 2 a 120 segundos y controladas en sus valores idóneos. En caso de desviación excesiva, el ordenador emite una señal de alarma y registra los datos propios de la misma (tipo, hora en que se produjo, un análisis histórico del tiempo anterior y posterior a la alarma, etc.).

El ordenador central recibe los datos de la planta, realiza los cálculos necesarios para optimizar el rendimiento de cada unidad de proceso y pasa estos datos a los ordenadores de proceso que van a cambiar los puntos de consigna de los lazos de control (control supervisor).

Esta estrategia, conjuntamente con el uso del control avanzado, repercute directamente en la productividad y rendimiento, proporcionando ahorros económicos sustanciales que hacen que la refinería obtenga productos finales de la máxima calidad y a un precio competitivo.

Como beneficio complementario, y no menos importante, el ordenador puede analizar datos estadísticos del proceso para indicar condiciones anormales o inseguras mucho antes de que los técnicos de proceso puedan enterarse de ello.

Además, la transmisión de las señales de proceso por el bus de campo, utilizando sensores y válvulas inteligentes, reduce el coste de la instalación y el tiempo del proyecto, disminuye el coste del mantenimiento con una detección y un diagnóstico de las averías mas rápidos y obtiene una mayor exactitud en la medida de algunas variables mediante múltiples sensores y cálculos no lineales. De estudios realizados en campo se infiere que, con relación al control analógico, las reducciones en el coste abarcan:

- Cableado: 50%.
- Comprobación y calibración de los lazos: 90%.
- Espacio ahorrado en la sala de control: 85%.
- Mantenimiento: 50%.

9.12.2 Control DDC

En el control digital que apareció hacia los años 60, el computador llevaba a cabo todos los cálculos que realizaban individualmente los controladores *P + I + D*, generando directamente las señales que van a las válvulas. Este tipo de control se denomina "control digital directo" o DDC (*Direct Digital Control*); el computador está enlazado con el proceso en las partes que pueden verse en la figura 9.77.

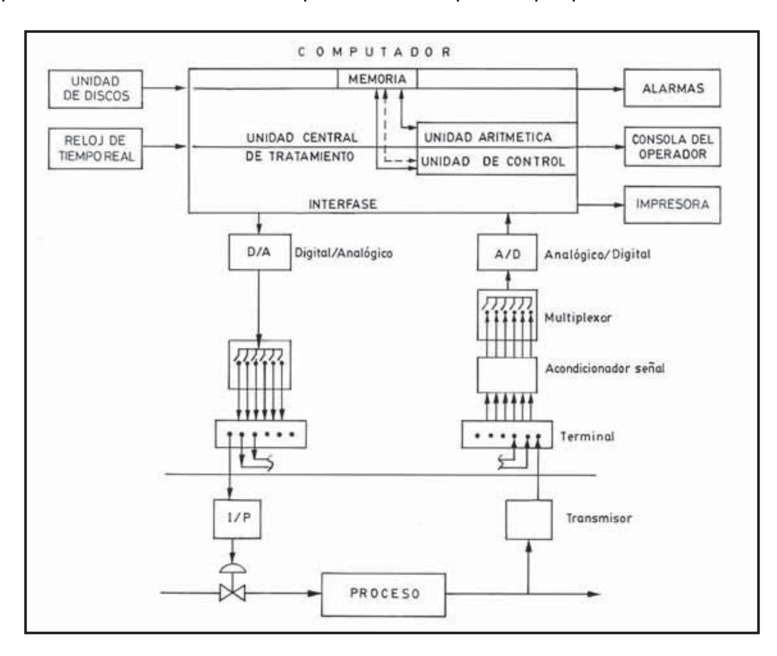


Figura 9.77 Componentes sistema DDC

Las señales procedentes de los transmisores de campo se reúnen en un terminal y pasan a una unidad de filtrado y acondicionamiento donde son convertidas a señales digitales, para ser usadas en los cálculos posteriores del control.

Estas señales de entrada pueden tener varios orígenes: señales de tensión procedentes de termopares, que se caracterizan por una f.e.m. pequeña que les hace sensibles al ruido eléctrico, no mantienen una linealidad entre la f.e.m. y la temperatura y necesitan una compensación de la unión fría, tacómetros, pH y conductividad, señales de corriente procedentes de transmisores y variaciones de resistencia de sondas que se caracterizan por una relación no lineal con relación a la temperatura.

A continuación se conectan a un *multiplexor* donde, de forma aleatoria o secuencial, pasan al computador. El computador permite comprobar cada señal de entrada y compararla entre límites prefijados para detectar si sale fuera de estas magnitudes y determinar así, a través de la lógica del computador, las causas de la desviación, iniciando una alarma o bien imprimiendo instrucciones para la operación de la planta.

Por otro lado, el computador dispone de varios algoritmos de control, de los cuales el más típico es el *PID* cuya fórmula clásica es:

$$\Delta P = K \ \Delta E + K_i \tau E + K_d \frac{\Delta^2 E}{\tau}$$

en la que:

ΔP = valor incremental de salida

τ = intervalo de muestreo

E = error de la muestra

ΔE = variación del error durante el intervalo de muestreo

$\Delta^2 E$ = grado de variación del error durante el intervalo de muestreo

K_p, K_i y K_d = factores de control proporcional, integral y derivativo

Y también el factor de compensación de retardo en los lazos de control que lo precisan:

$$D = \frac{A}{1 + T_1 s} \times \left[1 - \frac{1}{1 + s \times \frac{T_d}{2}} \right]$$

con:

D = compensación del tiempo de retardo

A = ganancia de tiempo de retardo

s = operador de Laplace

T_1 = retardo dominante

T_d = ganancia de tiempo muerto

Y el algoritmo de relación:

$$OP = A \times PV \pm B$$

con:

OP = señal de salida

A = ganancia

B = bias

PV = variable de proceso

Por otro lado, el sistema DDC compara la señal enviada a la válvula de control con la de entrada y determina la aceptabilidad de la información para la acción de control. Si ésta no es aceptable, se retiene la última posición de la válvula y el operador es prevenido, tomando el computador una acción de emergencia. De este modo, los límites de operación del proceso pueden estrecharse con seguridad de manera que éste puede llevarse a un punto de operación sin problemas.

El DDC permite una transferencia automático-manual sin perturbaciones y admite una fácil modificación de las acciones, de las configuraciones de los sistemas de control y de un calibrado automático, lo cual es muy importante en la puesta en marcha de la planta.

El computador, propiamente dicho, admite la información de entrada del sistema proveniente de CD-ROM, *pen-drive* u otros tipos de soporte, y almacena estos datos en una "memoria" conectada a una "unidad central de tratamiento", en cuya sección de control salen y entran los datos del proceso a través de la interfase.

Así pues, el DDC presenta, como ventajas con relación al control analógico, un control más sofisticado y más flexible que los controladores analógicos, un ahorro económico tanto mayor cuanto mayor sea el número de lazos y una buena fiabilidad.

Y como desventajas precisa de un sistema duplicado o triplicado de soporte porque un fallo sería catastrófico y el coste de la programación, que puede llegar a ser del 50% del precio total de la implementación.

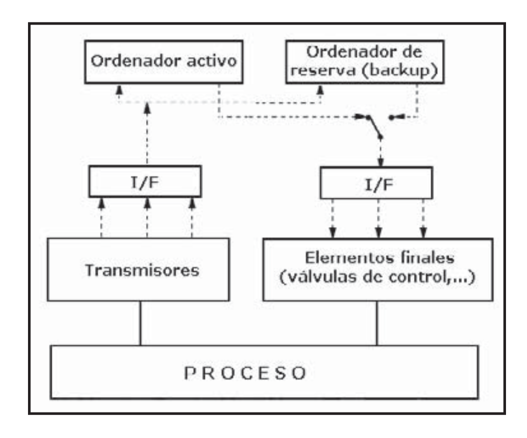


Figura 9.78 Control DDC con dos ordenadores, uno activo y el otro de soporte (back-up)

9.12.3 Control supervisor (SPC)

A pesar de estas ventajas, el gran problema que presenta el DDC es, como todo sistema electrónico, los posibles fallos de sus componentes a pesar de los avances constantes en la tecnología de los circuitos integrados y la creciente simplificación lograda en el diseño de los computadores.

Para alcanzar la máxima seguridad de funcionamiento y lograr la optimización idónea del proceso, el computador podría determinar los puntos de consigna más convenientes en cada instante, aplicarlos a los lazos de control situados dentro del propio computador o bien en el exterior en controladores individuales. Este tipo de control recibe el nombre de "control de puntos de consigna" o SPC (*Set Point Control*), o bien control supervisor. En la figura 9.79 se observará que, en paralelo con el lazo de control entre el transmisor y el controlador analógico, el computador calcula los puntos de consigna y los envía secuencialmente a cada instrumento. Si se presenta cualquier avería, el controlador regula la variable del proceso en el último punto de consigna que recibió del computador.

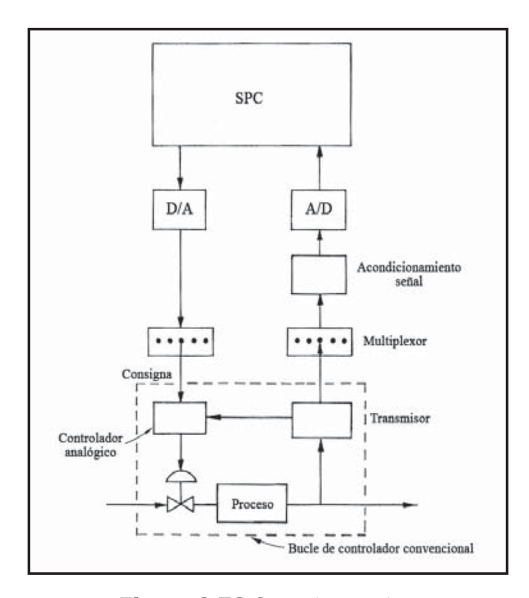


Figura 9.79 Control supervisor

Dentro del control supervisor se usa el término SCADA (*Supervisory Control and Data Adquisition*), nombre genérico que recibe el software que realiza las funciones de interfase con el operador, el ordenador central (o supervisor) y la recolección de datos históricos, informes, etc. Es un sistema de dos vías, que no sólo examina o recibe información de lo que ocurre a distancias remotas sino que también puede dar órdenes a los instrumentos distantes.

El ordenador central (*host*) usa los datos transmitidos desde el campo y presenta los resultados al operador para que actúe como supervisor e inicie alguna acción de control, y utiliza unidades remotas de transmisión situadas a largas distancias (kilómetros) del ordenador. Las unidades remotas de transmisión suelen ser "inteligentes", por lo menos en los lazos críticos. Aplicaciones típicas de SCADA son el control por parte del operador de procesos distribuidos en grandes áreas (pequeñas centrales hidroeléctricas de generación de energía, campos de extracción de petróleo, redes de tuberías de gas o petróleo, etc.), cambiando los puntos de consigna de controladores situados a distancia, abriendo o cerrando o posicionando válvulas distantes, parando o arrancando motores, excitando interruptores y alarmas y recogiendo información de variables de la planta.

Poco a poco, las funciones aportadas por los sistemas SCADA se han hecho semejantes al control distribuido, y la única diferencia reside en el tipo de circuito. SCADA transmite las señales a través de circuitos de baja velocidad (300 bits/s a 2.400 bits/s) y poco fiables para la integridad de los datos

(líneas telefónicas y radio), mientras que el control distribuido o el integrado lo hacen mediante circuitos locales de alta velocidad y seguridad de transmisión.

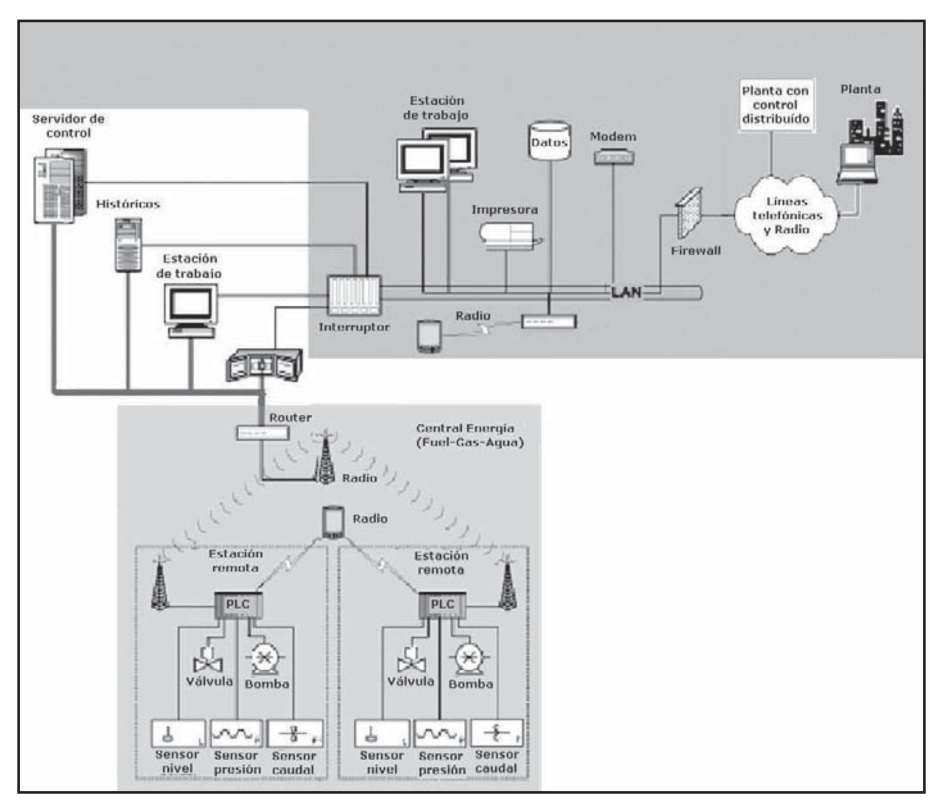


Figura 9.80 Control SCADA

9.12.4 Control distribuido (DCS)

El *control distribuido* es un sistema jerarquizado en varios niveles con uno o varios microprocesadores controlando las variables que están repartidas por la planta, conectados, por un lado, a las señales de los transmisores de las variables y, por el otro, a las válvulas de control. La filosofía de este control es distribuir el riesgo de fallo (limitando sus consecuencias) agrupando los instrumentos de tal forma que los diversos estados de operación, reserva y espera que puedan adoptar los microprocesadores de control disminuyan la probabilidad de la ocurrencia de dos o más fallos simultáneos.

El primer "*control distribuido*" para la industria apareció en noviembre de 1975 (TDC 2000 de Honeywell). Los equipos que forman parte del control distribuido (figura 9.81) son:

El *controlador básico* del sistema, que es un microprocesador que proporciona los clásicos controles *PID* y otros algoritmos de control. Es apto para el manejo de varios lazos (típicamente ocho) que proporcionan, entre otros, los siguientes algoritmos de control:

- Todo-nada.
- Flotante.

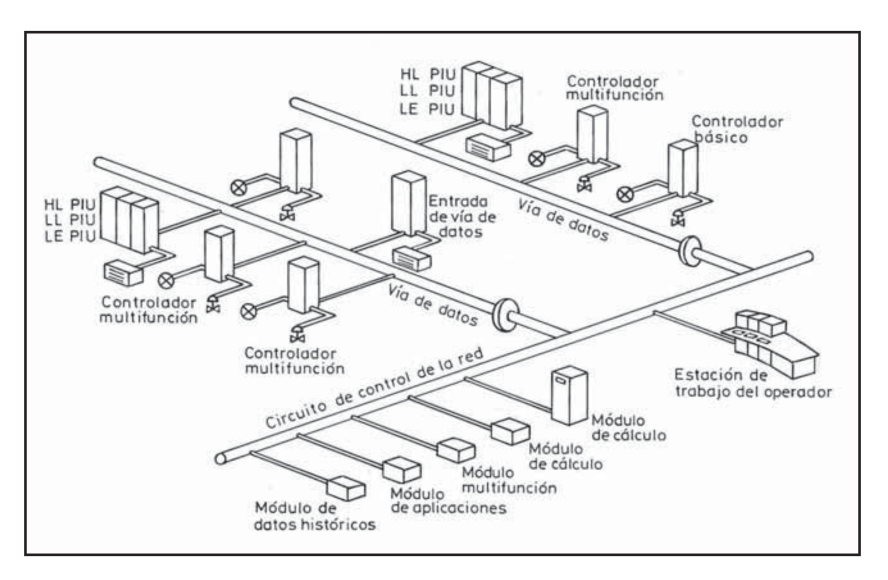


Figura 9.81 Control distribuido

- Proporcional de tiempo variable.
- *PID* normal.
- *PID* con autoajuste de las acciones de control.
- *PID* con ajuste externo del punto de consigna.
- *PID* con control anticipativo (*feedforward*).
- Rampas programadas (temperatura en procesos discontinuos).
- Bloques de recetas (*recipes*) (procesos discontinuos, etc.).
- Funciones auxiliares: sumador, multiplicador-divisor, relación, contador, adelanto-retardo, generador de funciones, limitador de valores alto/bajo, limitador de pendiente de variable, control secuencial (enclavamientos), selector máximo/mínimo, etc.
- Funciones de cálculo: comparación, valor absoluto, extractor de raíz cuadrada, caudal masa de gases (presión diferencial, presión y temperatura), totalización, comparador de desviaciones, humedad relativa, punto de rocío, valores promedio.
- Funciones matemáticas: suma, resta, multiplicación, división, ecuaciones, valor absoluto, exponencial, logaritmos, raíz cuadrada.
- Funciones lógicas: *AND*, *OR*, *XOR*, *NOT*, *Flip-Flop*, etc.
- Alarmas: alta, baja, analógica, monitorización de sistemas.
- Comunicaciones.
- Entradas al controlador de mV, V, mA, termopares (J, K, R, S, T, etc.), termoresistencias (Pt, níquel, cobre, etc.), resistencia en ohm, etc.

El *controlador multifunción* proporciona las funciones de control lógico que permiten regular un proceso discontinuo (*batch control*) y el manejo de procesos complejos, en los que el controlador básico está limitado. Utiliza, en su programación, un lenguaje de alto nivel. Tal es el caso del control de una columna de destilación, donde el control es dinámico, y es necesario realizar cálculos

en "tiempo real" sobre las ecuaciones de equilibrio entre el reflujo interno y el reflujo externo en cabeza de la columna.

El *control discontinuo (batch control)* se caracteriza por automatizar la entrada de ingredientes, en particular en la industria farmacéutica, definiendo su naturaleza y cantidades en lo que se llama la fórmula (*recipe*). Debido a que se fabrican muchos productos diferentes en la misma unidad de fabricación, es necesario que el equipo de control sea versátil para satisfacer la gran variedad de fórmulas (*recipes*) que pueden presentarse.

Cada operación básica o fase del proceso contiene 18 parámetros de la receta de fabricación que son parámetros de ajuste, control y alarma de las variables del proceso. El diseño lógico del sistema permite automatizar la entrada de ingredientes, definiendo su naturaleza y las cantidades contenidas en la fórmula, y está dividido en dos partes, los programas y las unidades de proceso.

Los programas se componen de 50 fases u operaciones básicas, y cada una de ellas tiene un código de identificación, la descripción de la operación y 18 parámetros asociados (con su identificación, su descripción y sus unidades de ingeniería). Se dispone de 30 programas y el operador puede crear nuevos programas usando la librería de operaciones básicas principales y modificar cada operación básica, de modo dinámico, de acuerdo con los datos de la fórmula, las fases y el tiempo estimado de ejecución de la operación.

El operador dispone de 60 unidades de proceso y, mediante un gráfico, puede cargar los programas de fabricación correspondientes y el sistema de control de las células o unidades de fabricación. En cada punto del programa de control de cada célula se encuentran las fases de fabricación extraídas de la librería de operaciones básicas, una fase de gestión de la célula y los códigos de entrada/salida situados en el *Controlador Multifunción Avanzado* (AMC).

Los *controladores programables (PLC = Programable Logical Control)* (figura 9.82) sustituyen a los relés convencionales utilizados en la industria. En lugar de disponer de pulsadores y relés para los circuitos de enclavamiento y para el accionamiento de los motores de la planta, con el correspondiente panel o cuadro de mandos y con los consiguientes cables de conexión, voluminosos y caros, el controlador programable aporta la solución versátil, práctica y elegante del software en un lenguaje especial, basado en la lógica de relés, llamado "*Ladder Logic*" (lógica de escalera), pensado más para el control digital que para el analógico, si bien, actualmente, dispone de todas las funciones analógicas imaginables.

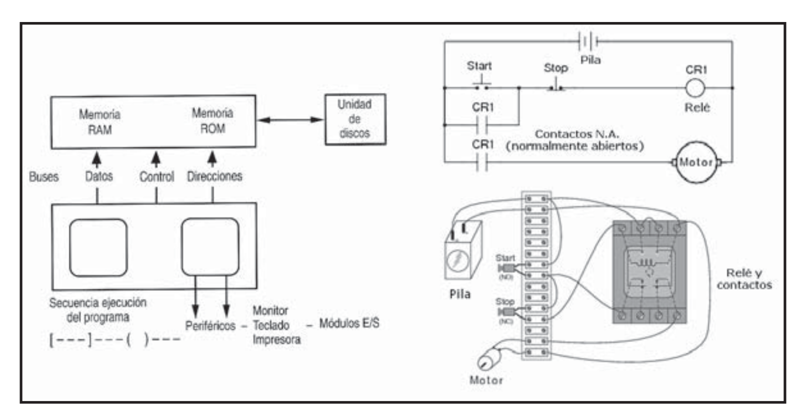


Figura 9.82 Control mediante PLC

El teclado del controlador dispone de símbolos que representan la lógica de los contactos: NA (normalmente abierto), NC (normalmente cerrado), temporización ON u OFF, contador, constante, etc. De este modo, pueden desarrollarse programas que representen cualquier circuito de enclavamiento, y comprobarlos con un simulador de contactos, antes de acoplar el controlador programable a la planta.

El *control secuencial* enlaza el control analógico (modulante con posiciones que varían continuamente en la válvula de control) con el control lógico. Por ejemplo, el arranque y el paro de una caldera de vapor deben hacerse de modo secuencial para eliminar, totalmente, el riesgo de una explosión que ocurriría si, en el peor de los casos, entrara agua en la caldera con el nivel muy bajo y con los tubos del serpentín al rojo.

El control secuencial se realiza con un conjunto de instrucciones o sentencias, parecidas a programas de ordenador, que establecen, en el tiempo, los puntos de ajuste de cada elemento para que tenga lugar la secuencia deseada. El lenguaje empleado es de alto nivel, parecido al *BASIC*, y orientado al usuario del ordenador personal, por lo que es fácil de escribir e interpretar.

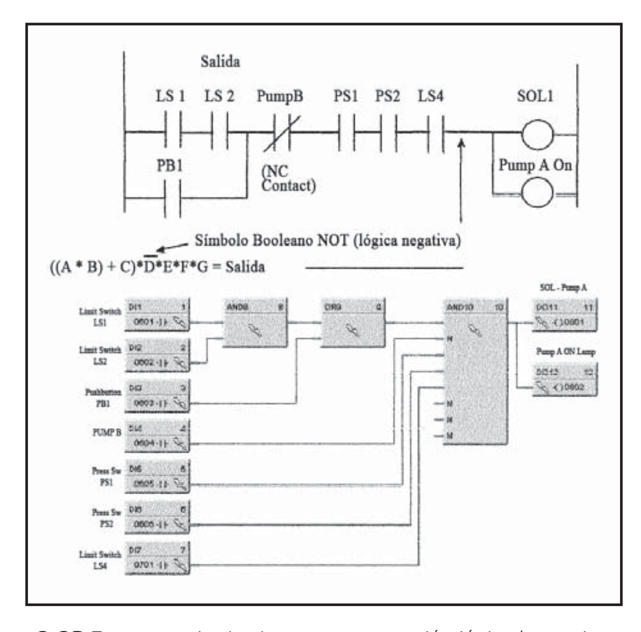


Figura 9.83 Estructura de circuitos en programación lógica (control secuencial)

Vía de comunicaciones por la que circulan mensajes controlados mediante varios mecanismos de comprobación de errores y que es redundante (dos cables coaxiales) para que, de este modo, una avería en un cable por cualquier motivo transfiera automáticamente las comunicaciones al otro cable, sin que el control se interrumpa.

Los mensajes que circulan por la vía de comunicaciones (entre los transmisores o las unidades de control situadas en los edificios de la fábrica) son controlados mediante varios mecanismos de comprobación de errores:

- Una comprobación bit por bit que asegura que cada bit contiene un impulso positivo y otro negativo, una comprobación del código y un conocimiento por parte del aparato emisor del mensaje recibido por el aparato receptor.

- Una función de conmutación entre cables de la vía redundante realizada por el sistema (director de tráfico) al definir cual de los cables redundantes es el activo, y además, desde el punto de vista de la seguridad intrínseca, el sistema limita asimismo la energía en las líneas de acceso.

Existen varios esquemas arquitectónicos de la vía de comunicaciones:

- El *sistema en anillo* consiste en un lazo cerrado al cual están conectados los microprocesadores locales a través de elementos de interfase que insertan mensajes y repiten los emitidos que pasan a su través; otras interfases se limitan a copiar los mensajes a medida que éstos circulan por el anillo. Los métodos de emisión de mensajes consiguen que, dentro de un período dado, se transmitan mensajes libres de interferencias. La ventaja principal que ofrece el sistema en anillo es su sencillez, lo cual da lugar a una buena fiabilidad.
- La *vía interrumpida* incorpora un "interruptor" (de aquí le viene el nombre) que intercepta los mensajes y los envía al lugar adecuado. Es usual enviar los mensajes con la técnica de multiplexión por división de frecuencia; es decir, a frecuencias únicas distintas y propias de cada microprocesador, siendo así posible transmitir muchos canales de datos.
- La *vía bidireccional* se diferencia del sistema en anillo en que no es una vía cerrada; de aquí que, en comparación, permite transmitir los mensajes en dos direcciones, ganando así rapidez de respuesta. Los microprocesadores y las interfases están conectados de forma parecida al anillo. La emisión de mensajes puede tener lugar mediante varios esquemas, utilizando interfases pasivas que aguardan a que la vía esté libre antes de radiar su mensaje, utilizando un "árbitro de acceso" que determina cual de los elementos de interfase puede utilizar prioritariamente la vía, o bien empleando el llamado "controlador de tráfico" que vigila cada elemento de interfase para ver si tiene algún mensaje que transmitir.

La *estación del operador* proporciona la comunicación con todas las señales de la planta para el operador de proceso, el ingeniero de proceso y el técnico de mantenimiento. La presentación de la información a cada uno de ellos se realiza mediante programas de operación.

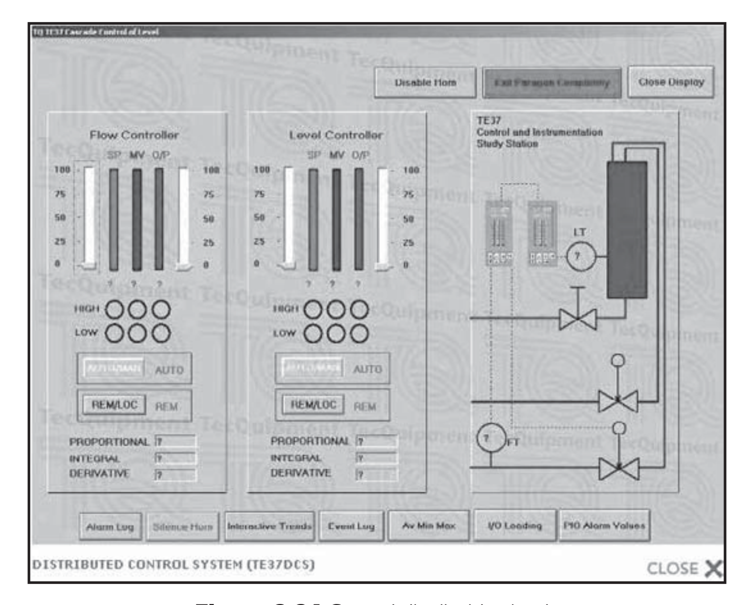


Figura 9.84 Control distribuido simple

El operador dispone de pantallas en la librería gráfica y puede manipular las variables deseadas, las alarmas, los gráficos reales del proceso, las curvas de tendencia y los lotes o ciclos de fabricación discontinua del producto (proceso *batch*). De este modo:

- El *ingeniero de proceso* puede editar programas del proceso, construir las representaciones en la pantalla de partes del proceso, etc.
- El *técnico de mantenimiento* puede, fundamentalmente, diagnosticar y resolver problemas en los elementos de control distribuido de la planta.
- El *computador* permite implementar los programas de aplicación de los usuarios, destinados a obtener información determinada de la planta, y procesarla con objeto de analizarla más adelante. El sistema se presta a optimizar variables, hacer cálculos especiales o complejos sobre balance de energía o de consumo de materias primas de la planta, y a confeccionar informes especiales.

Por otro lado, el computador puede comunicarse con otros ordenadores de mayor capacidad para obtener información sobre el consumo de materias primas, sobre los factores que influyen en la producción y en su rendimiento, y sobre los datos analíticos que se utilicen en la optimización de la planta. Y, como es lógico, esta información actual obtenida del proceso es accesible a la dirección, que puede utilizarla para el control de costos de la planta.

Alarmas de alto y bajo valor de la variable, alarmas de desviación entre el punto de consigna y la variable controlada, alarmas de tendencia que actúan si la variación de la variable excede de un valor prefijado, alarmas de estado de la señal de entrada o de salida, etc., que son importantes en el control de procesos.

Conviene evitar la instalación de un número excesivo de alarmas, ya que el operador se ve obligado a silenciarlas apretando el pulsador correspondiente y, además, le predisponen a no prestarles atención. Los casos en que la alarma actúa demasiadas veces durante el día son debidos a un mal diseño o a una condición del proceso que hay que corregir. Por ejemplo, una alarma de nivel de flotador situada en un tanque con agitador, en el cual no existan dispositivos de barrera contra las olas formadas en la superficie, estará actuando intermitentemente cuando el nivel alcance justamente al flotador. La solución a este caso ,y a otros parecidos, es la llamada alarma "inteligente" que actúa siguiendo la lógica del circuito, es decir, la comprobación de que la situación de la alarma no es una condición normal. En el ejemplo anterior, el sistema dispondría de un circuito lógico que, después de la primera alarma, comprobaría si el nivel bajaba y se paraba en un valor mínimo de la posición del flotador, y si éste no fuese el caso no actuaría.

Seguridad, fiabilidad y disponibilidad

El control distribuido tiene una *seguridad mejorada* con relación a los sistemas convencionales de control. Tal como se ha indicado, los transmisores disponen de un sistema de autocalibración y diagnóstico de averías que permite, al personal de mantenimiento, localizarlas y resolverlas rápidamente, caso de que se produzcan. El sistema es redundante y puede considerarse como una "inteligencia distribuida" que, en forma parecida a la humana, limita las consecuencias de un fallo, manteniendo el control del sistema.

Desde el punto de vista de la *fiabilidad* del equipo, el número de horas/fallo de los elementos de un sistema de control distribuido es considerable y varía en régimen permanente y a la temperatura de 25 °C desde 10.000 horas/fallo en los controladores básicos hasta 220.000 horas/fallo en la vía de comunicaciones (cable coaxial), y este tiempo sigue creciendo con las nuevas técnicas de fabricación que se van incorporando a la industria.

Otro parámetro interesante es la llamada *disponibilidad*, es decir, la fracción de tiempo que el sistema es operable. Por ejemplo, una disponibilidad del 90% significa que el sistema trabaja el 90% del tiempo, mientras que el 10% restante está en reparación. Pues bien, en los sistemas de control distribuido, la disponibilidad típica varía desde el 99,2% hasta el 99,9%, dependiendo de la bondad del equipo, de la existencia de piezas de recambio críticas y del mantenimiento. Por lo tanto, si el usuario dispone en la planta de dichas piezas, y ha contratado un buen mantenimiento, la seguridad de funcionamiento es clara. La disponibilidad depende de la configuración de montaje de los instrumentos.

En el caso de un solo instrumento, la disponibilidad es:

$$D = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$$

con:

μ = tasa de reparaciones

λ = tasa de fallos

Si el número de elementos es mayor (control distribuido), los cálculos pueden ser relativamente complejos y las combinaciones de las comunicaciones ser enormes. Por ejemplo, en cinco subsistemas existe un número de combinaciones igual a 10^5.

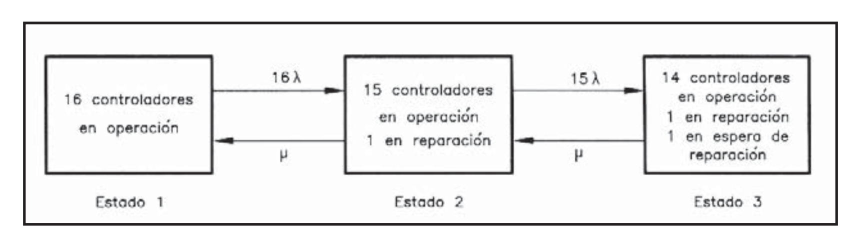


Figura 9.85 *Diagrama de fallos de tres estados en un control distribuido de 128 lazos*

En el circuito de la figura 9.85, que corresponde a 128 lazos repartidos entre 16 controladores, la configuración P_1 de 16 controladores en operación, puede pasar al estado P_2 de 15 controladores funcionando y uno en reparación, o bien al estado P_3 de 14 controladores funcionando, uno en reparación y otro en espera de reparación. Suponiendo que se alcanza un equilibrio entre los estados, es decir, que el número de reparaciones por unidad de tiempo μ es igual al número de controladores que van fallando en el tiempo, se tiene:

$$\mu \times P_2 = 16 \times \lambda \times P_1$$

$$\mu \times P_3 = 15 \times \lambda \times P_2$$

Y, resolviendo estas dos ecuaciones, resulta:

$$P_3 = P_2 \times \frac{P_2}{P_1} \times \frac{15}{16} = \frac{15 \times P_2^2}{16 \times P_1}$$

Lo que indica que este montaje perderá sólo 1/16 del control del sistema, lo cual es una ventaja indudable frente al sistema clásico de incorporar todos los controladores en un único ordenador central de control de procesos, donde un fallo es catastrófico parando totalmente la planta.

Aproximadamente, la probabilidad de dos fallos simultáneos es la raíz cuadrada de la probabilidad del primer fallo. En general, la probabilidad de cada fallo sucesivo (que debe ocurrir rápidamente no dando tiempo al servicio de mantenimiento para que intervenga) es la probabilidad del fallo precedente multiplicada por la relación de probabilidades del fallo actual al precedente. De este modo, es realmente difícil que ocurran dos o más fallos simultáneamente, ya que la probabilidad correspondiente disminuye en proporción geométrica y, además, en los sistemas modernos de control, el ordenador avisa inmediatamente del fallo y de su posición, permitiendo al servicio de mantenimiento la sustitución rápida del componente averiado (o de su tarjeta electrónica).

La disponibilidad típica varía desde el 99,2% hasta el 99,9%, dependiendo de la bondad del equipo, de la existencia de piezas de recambio críticas y del mantenimiento.

Así pues, la disponibilidad de los sistemas de control distribuido es muy alta, aparte de que, si ocurre algún fallo, el control se degrada muy suavemente.

9.13 Sistemas de control avanzado

9.13.1 Generalidades

Hasta aquí se han examinado las técnicas de control convencional aplicadas a procesos que se han supuesto lineales y sin retardos ni perturbaciones importantes. No siempre los procesos son así de sencillos; en bastantes casos son muy complejos, presentan retardos importantes, están sometidos a perturbaciones y pueden ser marcadamente no lineales, y con acoplamiento entre las variables. No es infrecuente que para estos casos, después de diversos intentos de aplicar controladores *PID* probando diversos ajustes, se acabe por controlar manualmente el proceso.

Las técnicas especiales que permiten el control de este tipo de procesos se denominan técnicas de *control avanzado*. En los años 70, se referían a las técnicas que se apartaban de las realizadas con los controladores clásicos neumáticos o electrónicos analógicos *PID*, y de las aplicaciones del control de relación, cascada y anticipativo (*feedforward*). Hoy en día, el control avanzado es sinónimo de implementación del proceso con tecnologías basadas en ordenadores o microprocesadores. Es una tecnología multidisciplinar en la que intervienen ingeniería de control, procesamiento de señales, estadística, inteligencia artificial e ingeniería del hardware y del software y, en particular, una comprensión del comportamiento de la planta unida a la aplicación juiciosa de las tecnologías de control actuales.

La utilidad del control avanzado reside en la contestación a la pregunta: dado el estado actual del proceso, ¿qué acciones hay que tomar para alcanzar las especificaciones deseadas? Si se dispone de un modelo exacto del proceso, y existe el modelo inverso (figura 9.86), la dinámica del proceso puede ser anulada por el modelo inverso. Sin embargo, es difícil disponer de un buen control, ya que todos los modelos contienen errores y no siempre puede obtenerse un modelo inverso y que sea controlable.

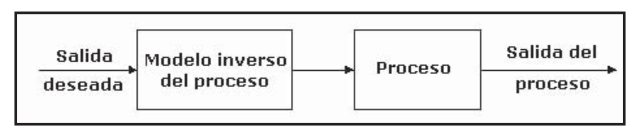


Figura 9.86 Modelo ideal del proceso

El control avanzado precisa, pues, de un modelo del proceso con la suficiente información para predecir las consecuencias de cambios en las condiciones de operación del proceso.

El modelo de comportamiento dinámico puede establecerse con ecuaciones diferenciales, pudiendo darse casos en los que no es factible su desarrollo debido a problemas, de tiempo y económicos, provocados por el poco conocimiento del proceso o bien por su complejidad que impide la resolución de las ecuaciones diferenciales. En este caso, se acude a modelos llamados de caja negra utilizando datos del proceso recogidos en la planta. Este tipo de modelo puede ser lineal (funciones de transferencia y series de datos) o no lineal (circuitos neuronales y series de datos). Es el más frecuentemente utilizado, ya que puede replicar suficientemente las tendencias dinámicas de los objetivos del proceso.

Los modelos cualitativos (lógica difusa) se utilizan cuando no es posible un tratamiento matemático debido a la naturaleza discontinua del proceso.

En otra técnica de modelos se emplea la descripción del proceso en términos estadísticos (probabilística y correlación).

Existen diversos sistemas de control avanzado:

- *Correctores de retardo* del proceso, útiles en el caso de intercambiadores de gran capacidad.
- *Control robusto*, que es la tolerancia o insensibilidad del controlador ante los cambios o perturbaciones que puedan presentarse en las condiciones de trabajo del proceso.
- *Control linealizador* global.
- *Control estadístico* que trabaja en tiempo real con las leyes de probabilidad de las variables y que gracias a los cálculos de la media, la desviación estándar y otros valores, determina la tendencia de las variables aleatorias que pueden conducir a problemas de control o a cambios en la calidad de los productos fabricados.
- *Control multivariable* en el que se compensa la influencia mutua de diversas entradas y salidas del proceso.
- *Control óptimo* en el que el sistema cumple una ley de control tal, que la salida del controlador hace mínima la función objetivo (por ejemplo conseguir una rápida aproximación al punto de consigna y un mínimo rebasamiento de la variable manipulada).
- *Control adaptativo* en el que el sistema de control ajusta automáticamente sus parámetros para compensar los cambios que puedan producirse en el proceso.
- *Control predictivo* que, mediante modelos dinámicos del proceso, se anticipa y prevé las situaciones futuras del proceso en base al conocimiento de los datos pasados y los actuales.
- *Sistemas expertos* que, mediante una base de conocimientos, se integran en el sistema de control de la planta para asistir al operador en la detección y en la solución de los casos en que el proceso sale fuera de control.
- *Control por redes neuronales*, que es una forma de control que imita el funcionamiento de las neuronas del sistema nervioso.
- *Control por lógica difusa*, que utiliza operadores para describir un sistema mediante reglas, haciendo mas humano el control y siendo adecuado para el control de procesos no lineales y con un comportamiento variable en el tiempo.

La estructura general del control avanzado puede verse en la figura 9.87.

La señal de salida del modelo predictivo y_{pr} se resta a la del proceso y_p, y el error resultante E, debido a la aproximación que necesariamente realiza el módulo predictivo del futuro, modifica el mecanismo de compensación para cambiar la estrategia actual del control, actuando sobre el controlador y sobre

el generador de trayectoria. Éste, a su vez, genera un valor del punto de consigna y_r, diferente del punto de consigna (S.P. = *Set Point*) que el operador ha fijado en el sistema.

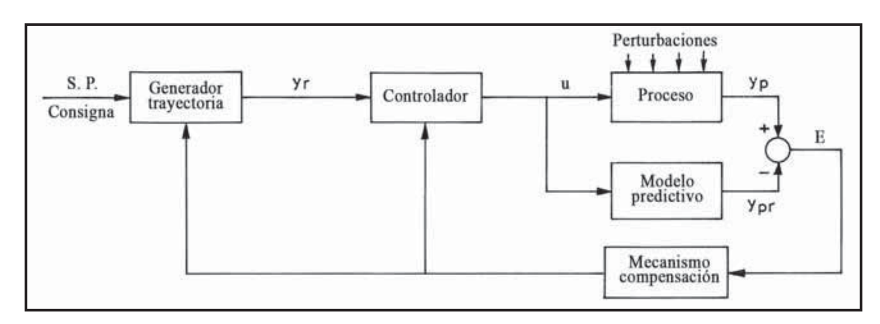


Figura 9.87 Estructura del control avanzado

El generador de trayectoria se encarga de ir al valor deseado de la variable del proceso en las mejores condiciones posibles. Es una función de los criterios establecidos y proporciona una gran robustez del control predictivo trabajando prácticamente en el límite de estabilidad.

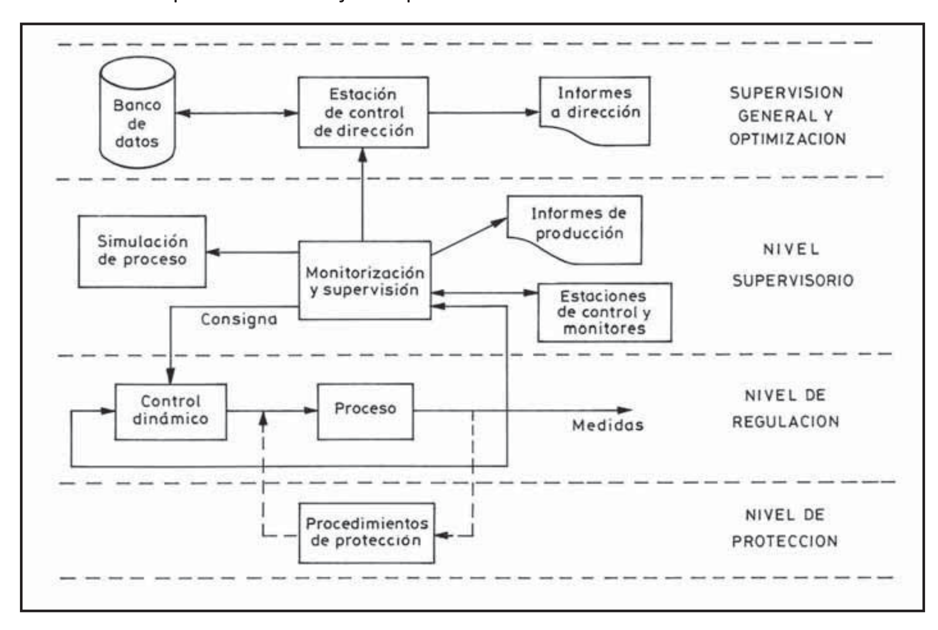


Figura 9.88 Niveles jerárquicos del control avanzado

Dentro del control avanzado pueden establecerse los niveles de jerarquía (figura 9.88):

- *Optimización* aplicable, generalmente, a los procesos individuales. Típicamente consiste en un control con restricciones que conduce una variable a su valor óptimo hasta que el sistema alcanza un límite (o restricción), o bien llega al valor óptimo.
- *Supervisión*, que va desde un simple lazo de control hasta complejos algoritmos de control multivariable. La mayor parte de las funciones de control avanzado se encuentran en este nivel.

El control supervisor es beneficioso en los siguientes casos:

1. Posibles pérdidas económicas ante retardos en la respuesta del proceso a las perturbaciones.
2. Ajustes frecuentes de las acciones de control.
3. Dificultades en establecer las mejores condiciones de operación para una producción definida.
4. Pérdidas de fabricación no evidentes al operador por fallos de ajuste de la instalación ante las perturbaciones.

- *Regulación*, que es excelente en el control distribuido por la capacidad del sistema para incluir algoritmos de control sofisticados o efectuar cambios en la interrelación de los lazos, gracias al software del control distribuido. En los instrumentos convencionales deben conectarse físicamente los aparatos entre sí.
- *Protección* o *seguridad*, que proporciona una seguridad intrínseca de base.

Como ejemplos generales, se expone, a continuación, una descripción breve de algunas de estas aplicaciones referidas a calderas de vapor, reactores y al control de procesos en base estadística.

Calderas de vapor

En las calderas de vapor (figura 9.89), el sistema compensa en circuito cerrado las perturbaciones que se presentan en la operación de la caldera, para reducir el consumo de combustible. Dispone de un elemento de simulación y optimización de la caldera que recibe todos los datos de operación y los datos económicos de funcionamiento, y determina la forma óptima de operación, calculando los puntos de consigna de los controladores.

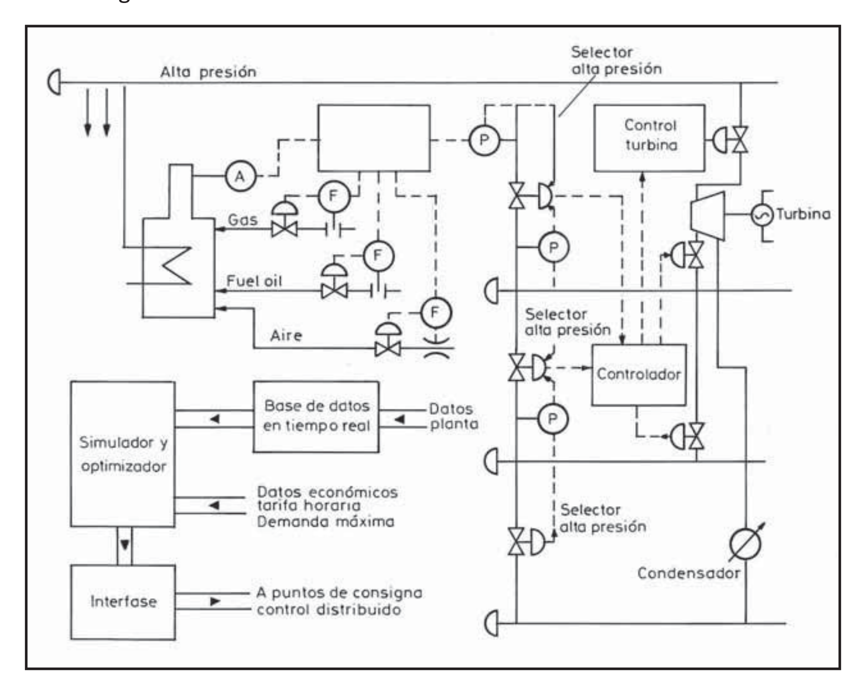


Figura 9.89 Control avanzado de una caldera de vapor

El sistema permite la operación *on-line*, es decir el funcionamiento en tiempo real de la caldera, y *off-line*, es decir un estudio del comportamiento del sistema ante ensayos de funcionamiento, sin peligro para el control de la caldera. En este último caso pueden probarse diversas hipótesis y sus consecuencias en el control de la caldera de vapor. En otras palabras, el control avanzado contesta a la pregunta ¿qué pasaría si...?.

El sistema permite la optimización en el uso de diversos combustibles y el cálculo del coste de la energía eléctrica (cogeneración) suministrada por las turbinas asociadas a la caldera. Éstas se utilizan en el aprovechamiento de la energía suministrada por el vapor y no utilizada en la planta, la que se envía y factura a la compañía eléctrica.

Reactores

Los reactores se utilizan, típicamente, en plantas de polietileno y en procesos de polimerización. En las plantas de polietileno, se utilizan modelos matemáticos multivariables. Los sistemas de control avanzado, predicen los productos que se fabrican y los controlan mediante la variación de los productos entrantes y permiten una transición suave de fabricación entre dichos productos.

El sistema (figura 9.90) controla las propiedades del polietileno tales como el índice MI (*Melt Index*) o índice de caudal FI (*Flow Index*), y la densidad. Estas propiedades son una función de la concentración de hidrógeno, de etileno, de comonómero (propileno, etc.), de la reactividad del catalizador, de la temperatura, de las impurezas y de otros factores. Existe una diversidad de modelos, según el proceso, que engloban todas las variables anteriores, las que influyen en la reacción.

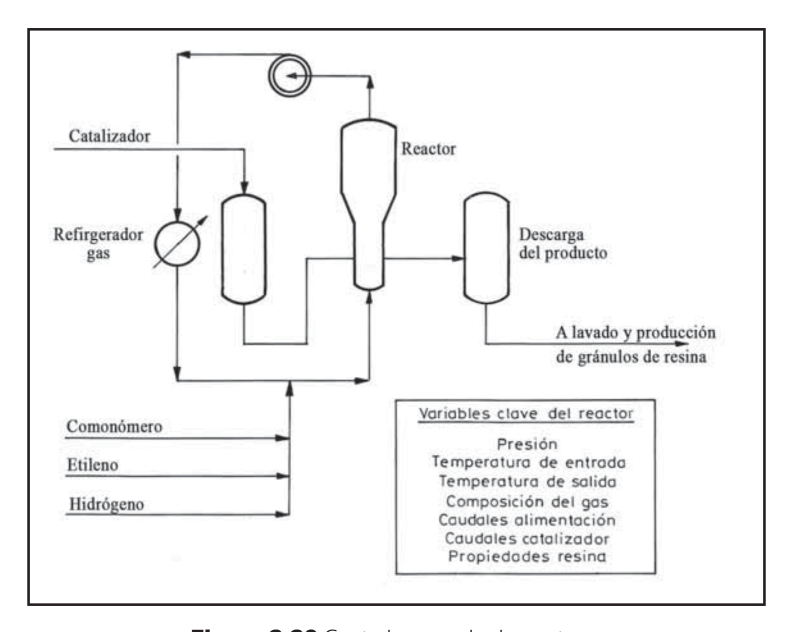


Figura 9.90 Control avanzado de reactores

El modelo adoptado del proceso y las condiciones de operación predicen las propiedades del producto final que va a fabricarse, lo que permite, al sistema, el cálculo de las condiciones requeridas para mantener las propiedades deseadas en el producto final. Mientras que en otros procesos basta controlar en lazo cerrado las variables, en los reactores, dicho procedimiento comportaría

un tiempo excesivo por la necesidad de analizar el producto para comprobar si está o no dentro de las especificaciones. Por este motivo, es necesario trabajar con un modelo del proceso que facilite la predicción rápida de la evolución de la reacción en el sentido de conocer la marcha de la fabricación de los productos. Algunas variables, tales como las desviaciones en el rendimiento del catalizador y las variaciones en el intercambio calorífico, que no pueden modelizarse, se tienen en cuenta cada vez que el modelo se actualiza.

Los sistemas de control avanzado se aplican a procesos determinados y su objeto es obtener el mejor control del proceso particular que se estudie en la planta. Presentan los siguientes beneficios:

- Ahorro de energía del 5%.
- Aumento de un 3% a un 5% de la capacidad de fabricación de la planta.
- Reducción de los costes de operación de la planta de un 3% a un 5%.
- Mejora del porcentaje de recuperación de productos de un 3% a un 5%.
- Tiempo de retorno de la inversión de uno a cinco años.
- El rendimiento global mejora de un 5% al 35%.

Las aplicaciones de los sistemas de control avanzado aumentan día a día y se aplican a procesos tales como fabricación del amoníaco, procesos discontinuos, hornos, calderas de vapor, plantas de cogeneración, plantas petroquímicas, sistemas de ahorro de energía, reactores químicos, plantas de gas natural, compresores, servicios generales, control estadístico del proceso, etc.

En el futuro, puede afirmarse que la tecnología digital evolucionará integrando totalmente la información de la planta con un flujo de información continuo entre las diversas áreas de la planta (fabricación, mantenimiento, laboratorio y gestión). La aplicación de los instrumentos neumáticos y electrónicos analógicos ha quedado limitada a pequeñas plantas, ya que frente a la instrumentación digital tienen una peor relación costo/prestaciones y no disponen de la facilidad de comunicación entre instrumentos que posee la señal digital, ni de la facilidad de almacenar y grabar datos históricos de la planta.

9.13.2 Correctores

Cuando el retardo del proceso es grande, tal como ocurre en un intercambiador de calor de gran capacidad (serpentín muy largo), el control *PI* o *PID* clásico no puede realizar una regulación aceptable debido a que, cuando la válvula de control se mueve, los cambios que introduce en el proceso tardan un tiempo en ser captados por el elemento primario y, por lo tanto, en el controlador, por lo que éste mueve la válvula a una nueva posición que es posible que no sea la adecuada para las nuevas condiciones de servicio que existan en aquel momento.

Utilizando técnicas digitales es posible eliminar el retardo del proceso. Uno de los tipos de control empleados es el *corrector de Smith* que utiliza un corrector de tiempo muerto (figura 9.91). La función de transferencia del conjunto proceso + corrector es:

$$E(s) = \frac{G_s \times e^{-\tau s}}{1+\theta s} + \frac{K(1-e^{-T_2 s})}{1+T_1 s} = \frac{G_s \times e^{-\tau s}}{1+\theta s} + \frac{K}{1+T_1 s} - \frac{K(e^{-T_2 s})}{1+T_1 s}$$

Por identificación del proceso se determinan G_s, θ y τ.

Y de aquí, $K = G_s$, $T_1 = \theta$ y $T_2 = \tau$.

Con lo que:

$$F(s) = \frac{G_s}{1 + \theta s}$$

expresión en la que ha desaparecido el retardo del proceso. El sistema es válido siempre que el modelo del proceso sea de primer orden con retardo. Como inconveniente cabe señalar que, en el controlador, aparece la medida compensada en lugar de la variable real y que muchas fuentes de retardo son variables y desconocidas.

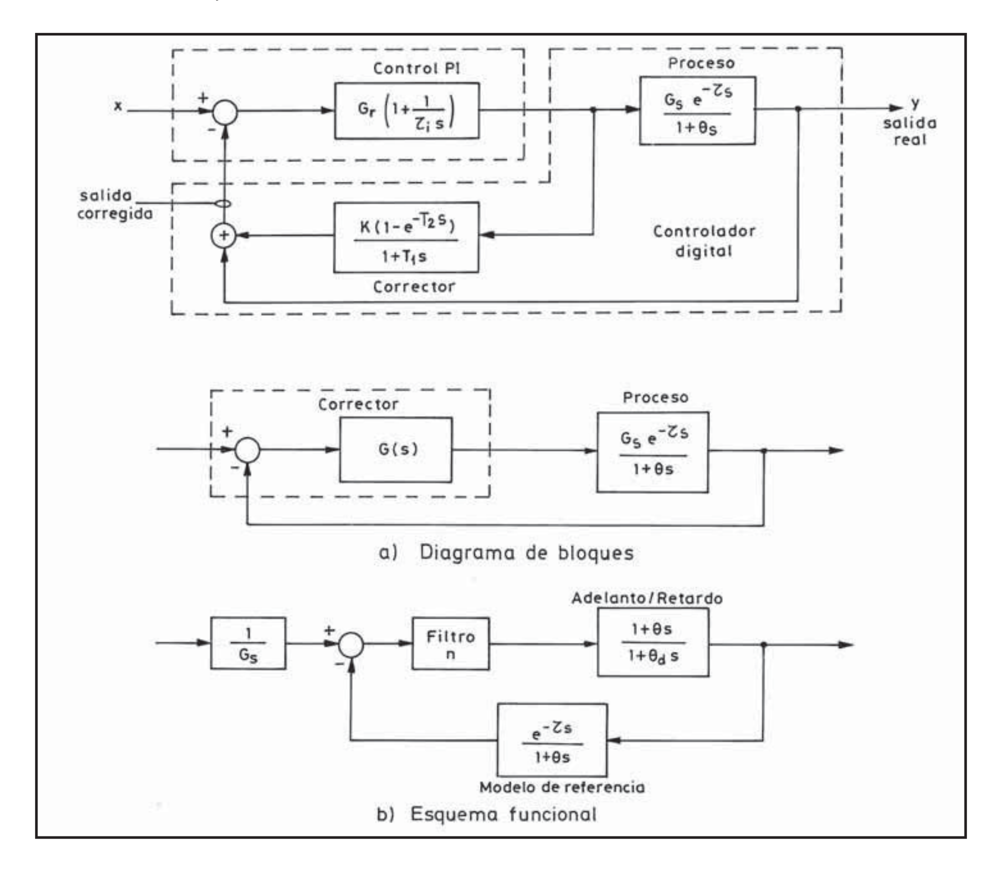


Figura 9.91 Corrector de Smith y de modelo de referencia

En otro tipo de *corrector de Smith*, el corrector de tiempo muerto actúa sobre el controlador mediante polarización (bias), y así el controlador capta la medida real de la variable del proceso. Aunque la identificación del proceso sea aproximada y los coeficientes del corrector (K, T_1 y T_2) no sean correctos, la regulación por corrector de tiempo muerto es mejor que la clásica *PI* o *PID*. Puede comprobarse provocando perturbaciones por cambio en el punto de consigna o variando la ganancia del proceso por cambio en las condiciones de trabajo.

El *corrector por modelo interno de referencia* tiene interés porque fija la trayectoria de la medida ante un cambio en la consigna, con el objeto de obtener una respuesta en tiempo mínimo y sin rebasamiento.

En la figura 9.91 puede verse el diagrama de bloques correspondiente y su esquema funcional. Los parámetros a fijar son:

G_s = ganancia estática del proceso

θ = constante de tiempo

τ = tiempo de retardo

θ_d = constante de tiempo deseada

n = orden del filtro

que se determinan realizando ensayos en el proceso.

9.13.3 Control robusto

Una característica interesante del controlador es la denominada *robustez*, concepto que indica la tolerancia o insensibilidad del controlador ante los cambios o perturbaciones que puedan presentarse en las condiciones de trabajo del proceso. De este modo, un controlador robusto garantiza seguridad en el control del proceso ya que, si se presentan cambios, no es necesario reajustar los parámetros del controlador, ni parar el proceso.

La robustez obliga a cuantificar las incertidumbres de los errores del modelo del proceso debidas al comportamiento no lineal o variable en el tiempo. Si este objetivo se logra, se dispone de una descripción del proceso en todas las condiciones de operación posibles, lo que permite diseñar un controlador robusto que va a mantenerse estable y conseguir que el proceso trabaje dentro de especificaciones.

La robustez es un compromiso entre el objetivo del comportamiento deseado del proceso y el logro de la estabilidad en condiciones de incertidumbre del proceso. El control por modelo interno (figura 9.92) utiliza un filtro de paso bajo, que atenúa las incertidumbres en la realimentación generadas por la diferencia entre las señales de salida del proceso y del modelo, y sirve para reducir una actuación excesiva del controlador.

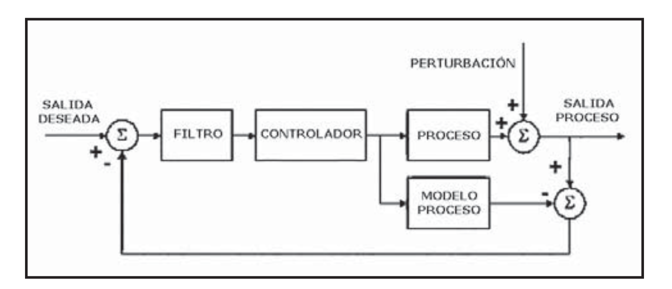
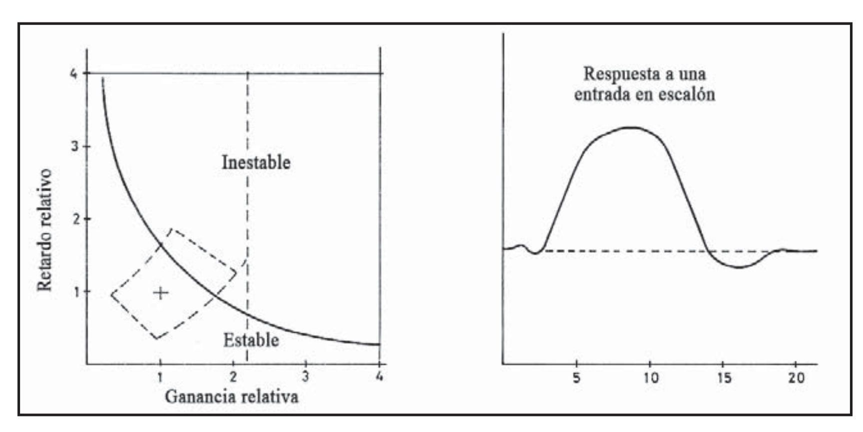
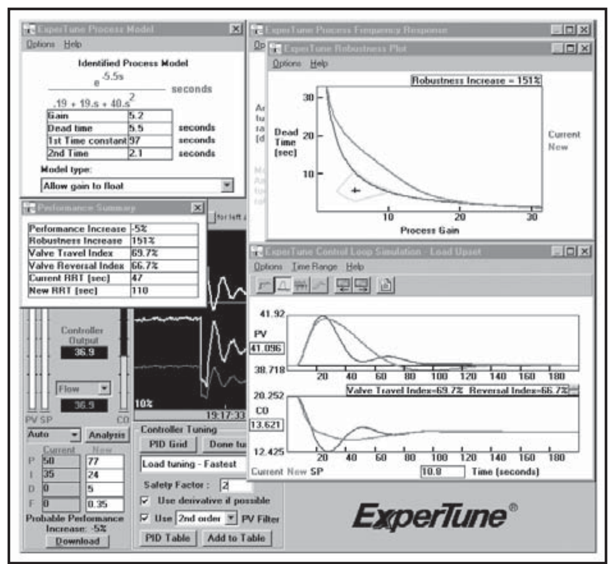


Figura 9.92 Estrategia de control de modelo interno

La robustez puede representarse en un gráfico de coordenadas, con la ganancia relativa en abscisas y el retardo relativo en coordenadas, referidos ambos al punto de operación óptimo para el cual fue ajustado el controlador. En la figura 9.93 puede verse un ejemplo de gráfico de robustez en el que se aprecia que la curva retardo-ganancia es la curva límite de estabilidad del proceso, separándola en dos zonas, la inestable y la estable. Con una cruz se representa el valor original de la ganancia relativa y el retardo relativo, es decir 1,1.

Como se considera aceptable un factor de seguridad de 2 en la ganancia relativa y el retardo relativo, el programa traza también un polígono punteado que representa estos límites. Por simple observación del gráfico del ejemplo, se comprueba que un aumento de la ganancia del 75% conduce a la inestabilidad, por lo cual cabría utilizar otros métodos de ajuste que proporcionaran mejores resultados de estabilidad del proceso.





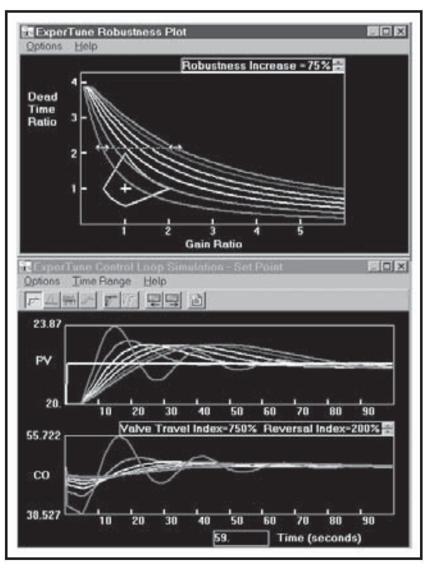


Figura 9.93 *Robustez. Fuente: ExperTune*

9.13.4 Control linealizador global

En procesos altamente no lineales, el control adaptativo no puede captar de forma suficientemente rápida los cambios de trayectoria del proceso. Pueden utilizarse controladores no lineales especiales, controladores por redes neuronales y controladores no lineales de modelo mecanicista basados en conceptos de geometría diferencial. Estos últimos emplean series de Taylor para linealizar los modelos no lineales antes de aplicar los controladores de modelo lineal.

La linealización no es local sino que es global en el espacio abarcado por los estados del proceso y se consigue con un precompensador diseñado, de tal forma, que la relación entre las entradas al precompensador y la salida del proceso es lineal. De este modo, pueden aplicarse técnicas lineales a la planta pseudolineal. En la figura 9.94 se muestra este tipo de control.

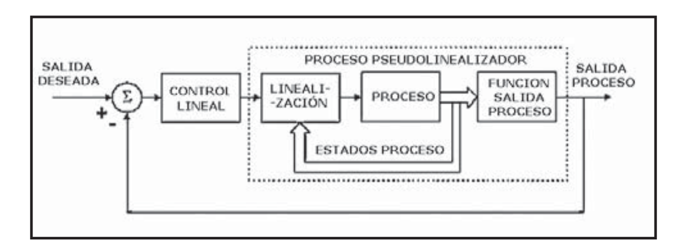


Figura 9.94 Controlador linealizador global

9.13.5 Control estadístico del proceso (SPC)

El *control estadístico del proceso* monitoriza el comportamiento de las variables aleatorias que pueden conducir a problemas de control o a variaciones en la calidad de los productos fabricados. La filosofía del control estadístico nace en 1931 cuando Walter A. Shewhart estableció el criterio: "*Las desviaciones fuera de límites de un proceso que sigue una rutina normal de fabricación, indican que el proceso ha quedado afectado gravemente y que ya no es económico hasta que no se elimine la causa de la anomalía*".

La fijación de los límites de control viene dada por las fórmulas:

Límite superior de control de la variable:

$$(UCL_x) = \overline{X} + A_2 \times \overline{R}$$

Límite inferior de control de la variable:

$$(LCL_x) = \overline{X} - A_2 \times \overline{R}$$

Límite superior de control del margen de aviso:

$$(UCL_\tau) = D_4 \times \overline{R}$$

Límite inferior de control del margen de aviso:

$$(LCL_\tau) = -D_3 \times \overline{R}$$

donde:

X = promedio de los subgrupos de la variable

R = promedio de los subgrupos de margen de la variable

A y D son constantes cuyo valor depende del tamaño del subgrupo y que se determinan estadísticamente

El comportamiento anormal del proceso puede verse por distintas tendencias (desviación en un sentido o recurrente, estratificación de los puntos, etc.).

Los gráficos de Shewhart representan una característica del proceso con relación al tiempo y trabajan con la media de la característica y con límites de aviso y de control. Indican las situaciones fuera de control estadístico por la posición en el gráfico de la característica. Suponiendo que ésta adopta una distribución normal, la probabilidad de que un valor se encuentre fuera de los límites de aviso es del 2,5% y que supere los límites de control del 0,1%. Identifican las desviaciones estadísticas mediante las reglas (figura 9.95):

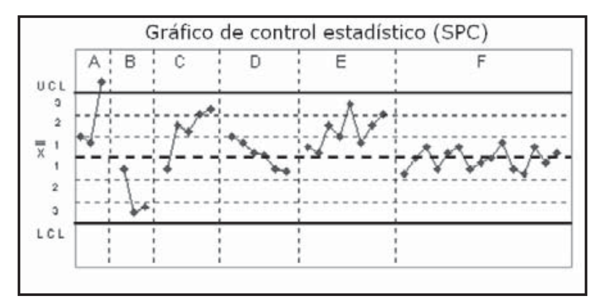


Figura 9.95 Gráficos de Shewhart

- Un punto que supera los límites de control del proceso (A fuera del límite superior UCL; B fuera del límite inferior LCL).
- Dos puntos consecutivos que caen fuera del área correspondiente a dos desviaciones estándar de la media (B).
- Cuatro de cinco puntos consecutivos que caen fuera del área correspondiente a dos desviaciones estándar de la media (C).
- Seis o más puntos sucesivos que están en la misma dirección de subida o bajada (D).
- Ocho o más puntos consecutivos, o bien siete puntos, que caen en un lado de la media (E).
- Quince puntos en hilera en cualquier lado de la media que es una desviación estándar de la media (F).

Los *gráficos de suma acumulativa (CuSum)* representan la suma algebraica de varias características del proceso con relación al tiempo. Se considera una colección de k muestras de tamaño n y se calcula la media de cada muestra. El gráfico *CUSUM* se forma representando:

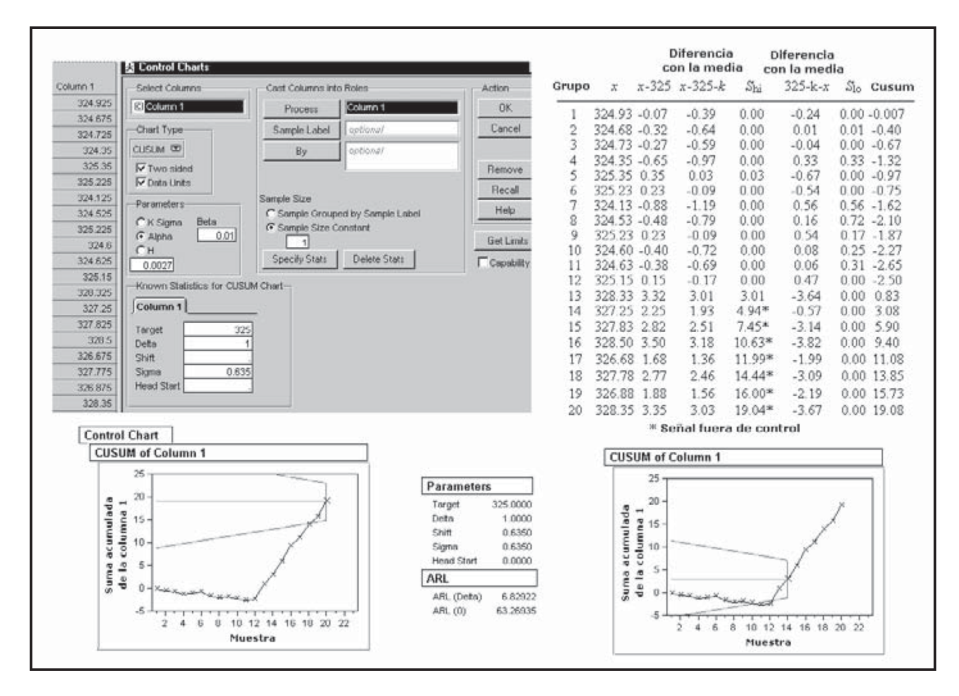
$$S_m = \sum_{i=1}^{m} (x_i - \mu_0)$$

donde:

μ_0 = valor estimado de la media controlada

En la figura 9.96 puede verse un gráfico CUSUM con valores críticos de un proceso, por ejemplo temperatura, en el que se han considerado las alarmas:

- α, probabilidad de una falsa alarma. El instrumento indica una alta temperatura que no se ha producido.
- β, probabilidad de no detectar un cambio en la media de la variable, que de hecho ha ocurrido.
- δ (delta), desviación en la media de la variable del proceso que deseamos detectar, expresada en función de la desviación estándar.



Grupo	x	x-325 (Diferencia con la media)	x-325-k (Diferencia con la media)	S_{hi}	325-k-x (Diferencia con la media)	S_{lo}	Cusum
1	324.93	-0.07	-0.39	0.00	-0.24	0.00	-0.007
2	324.68	-0.32	-0.64	0.00	0.01	0.01	-0.40
3	324.73	-0.27	-0.59	0.00	-0.04	0.00	-0.67
4	324.35	-0.65	-0.97	0.00	0.33	0.33	-1.32
5	325.35	0.35	0.03	0.03	-0.67	0.00	-0.97
6	325.23	0.23	-0.09	0.00	-0.54	0.00	-0.75
7	324.13	-0.88	-1.19	0.00	0.56	0.56	-1.62
8	324.53	-0.48	-0.79	0.00	0.16	0.72	-2.10
9	325.23	0.23	-0.09	0.00	0.54	0.17	-1.87
10	324.60	-0.40	-0.72	0.00	0.08	0.25	-2.27
11	324.63	-0.38	-0.69	0.00	0.06	0.31	-2.65
12	325.15	0.15	-0.17	0.00	0.47	0.00	-2.50
13	328.33	3.32	3.01	3.01	-3.64	0.00	0.83
14	327.25	2.25	1.93	4.94*	-0.57	0.00	3.08
15	327.83	2.82	2.51	7.45*	-3.14	0.00	5.90
16	328.50	3.50	3.18	10.63*	-3.82	0.00	9.40
17	326.68	1.68	1.36	11.99*	-1.99	0.00	11.08
18	327.78	2.77	2.46	14.44*	-3.09	0.00	13.85
19	326.88	1.88	1.56	16.00*	-2.19	0.00	15.73
20	328.35	3.35	3.03	19.04*	-3.67	0.00	19.08

* Señal fuera de control

Figura 9.96 *Ejemplo de gráfico CUSUM. Fuente: Sematech*

Si la media del proceso está en condiciones de control centrada en μ_0, el gráfico CUSUM variará de forma aleatoria alrededor de cero. Pero si la media del proceso aumenta, los puntos del gráfico CUSUM iniciarán eventualmente una subida y, de forma análoga, lo harán a la inversa si la media del proceso disminuye.

El control estadístico del proceso permite, mediante el análisis de Pareto, relacionar la ocurrencia de los problemas con su coste asociado, de modo que muestra la frecuencia de los mismos, dando prioridad a los de mayor coste. De este modo, pueden determinarse las causas y los efectos (análisis de árbol de fallos) y realizar estudios de correlación y de influencia de los parámetros en la marcha del proceso.

Y así puede averiguarse si un instrumento está averiado en el sentido de que ha quedado bloqueado en su señal de salida, si una válvula de control está con el obturador agarrotado por deformación del vástago o por otra causa, si es posible trabajar al límite de las especificaciones del producto, si los puntos de indicación de algunas variables han variado significativamente para que puedan representar algún problema de desviación, etc.

El sistema puede trabajar, en tiempo real, con leyes de probabilidad de las variables para los valores no aleatorios y presenta los resultados en forma de gráficos de tendencia, de tablas y de gráficos en general. Este tipo de control, mediante visualizaciones especiales, alerta al operador para que pueda actuar sobre el proceso.

Los beneficios que proporciona este sistema abarcan: evitar paros de la planta, impedir dentro de lo posible que las variables salgan fuera de control, asistir al departamento de mantenimiento en los programas de mantenimiento preventivo y proporcionar al cliente registros o certificados de la bondad de los productos que adquiere.

9.13.6 Control multivariable

Un proceso es *multivariable* cuando posee varias entradas y varias salidas importantes que se influyen mutuamente, es decir, si cualquier cambio en una de las entradas provoca una variación en varias señales de salida.

Un ejemplo simple lo constituye un mezclador de agua caliente y agua fría, donde al variar el caudal de agua caliente cambia la temperatura y el caudal de salida, y al variar el caudal de agua fría cambia también la temperatura y el caudal de salida. Se instalan dos controladores de caudal, uno de agua caliente y el otro de agua fría, y se obtiene el diagrama de bloques de la figura 9.97.

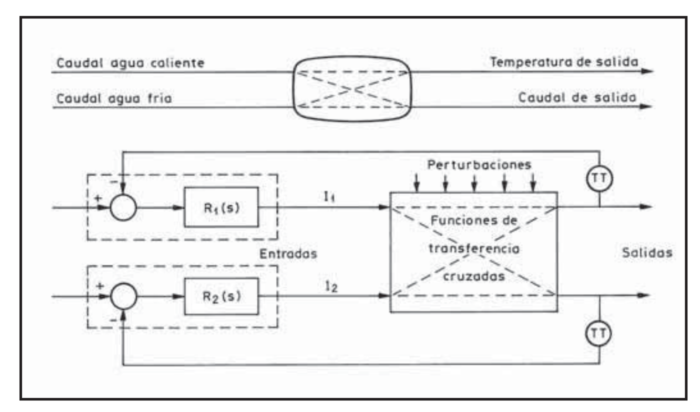


Figura 9.97 Control multivariable

Un caso más complejo lo constituye una columna de destilación (figura 9.98), donde una variación del caudal de reflujo provoca cambios en los productos de cabeza y de fondo, mientras que cambios en el calor añadido en fondo dan lugar, asimismo, a variaciones en los productos de cabeza y de fondo. En la figura 9.98 puede verse la columna de destilación y una comparación entre el control distribuido y el multivariable en el mantenimiento de las especificaciones de un producto.

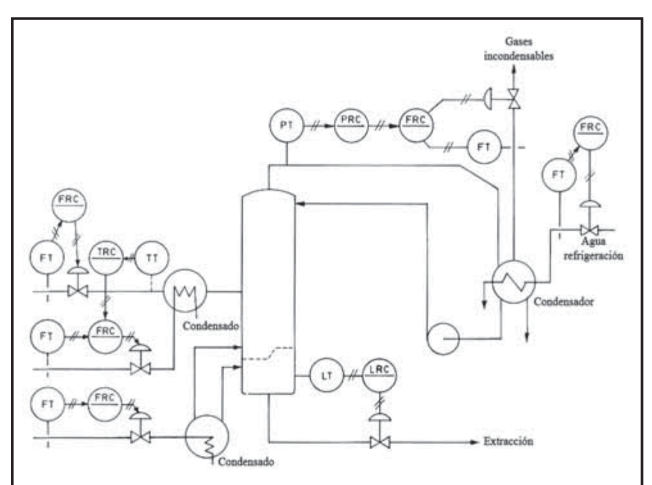




Figura 9.98 Columna destilación y comparación control distribuido y multivariable. Fuente: GE Industrial Systems

Los lazos del ejemplo no pueden controlarse con un controlador clásico *PID*, de modo que es necesario acudir a lo que se denomina *control multivariable*. Su objetivo es compensar las perturbaciones en las variables y desacoplar las mismas, es decir, si por ejemplo se cambia el punto de consigna de una de las variables, sólo ésta debe quedar afectada, sin modificar o perturbar las restantes. En la figura 9.99 puede verse el diagrama de bloques de un control multivariable dotado de desacoplador.

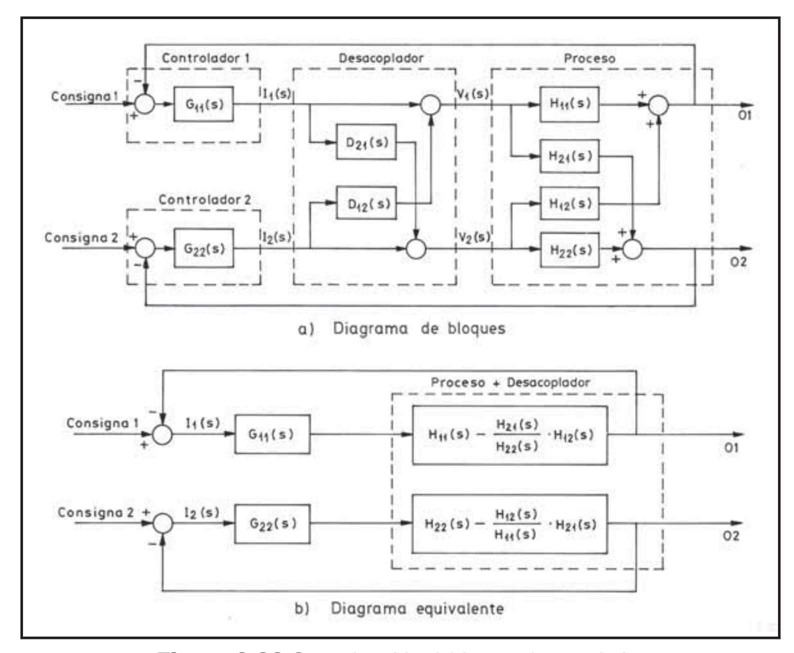


Figura 9.99 Control multivariable con desacoplador

Para buscar la función de transferencia del desacoplador debe cumplirse:

- Una variación en la señal de entrada I_1 no debe influir en *O2*.
- La influencia de la transmitancia $H_{21}(s)$ sobre *O2* se compensa mediante la función de transferencia $D_{21}(s)$ que enlaza $U_2(s)$ con $I_1(s)$.
- Una variación en la señal de entrada $I_2(s)$ no debe provocar ninguna reacción en *O1*.

Los parámetros pueden identificarse por cálculo de las funciones de transferencia, o bien del modo siguiente: se mantiene $I_2(s)$ constante y se varía $I_1(s)$ y se registra el valor de *O1*, de donde se deducen los parámetros del proceso + desacoplador 1. Análogamente se procede con la entrada $I_1(s)$.

Con un correcto desacoplamiento, el control multivariable pasa al de la figura 9.99. En la figura 9.100 puede verse una simulación del control multivariable.

9.13.7 Control óptimo

Un sistema de control debe cumplir unas especificaciones de funcionamiento determinadas: las que se establecen en el momento de diseñarlo. Estas especificaciones pueden obedecer a varios criterios: una respuesta temporal determinada, una desviación específica entre la variable y el punto de consigna, es decir, un error que cumpla condiciones determinadas, etc.

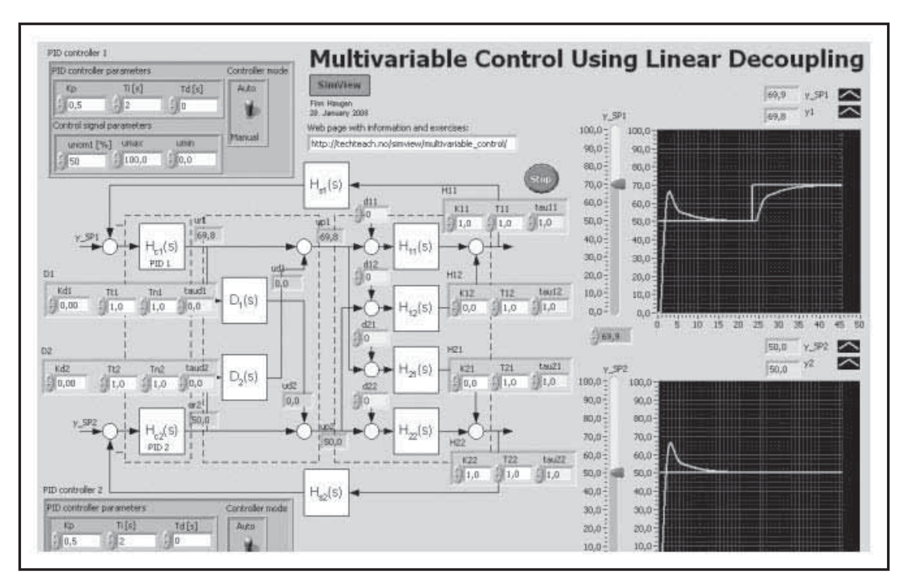


Figura 9.100 Control multivariable. Fuente: ExperTune

Un criterio típico es que, ante una desviación, el controlador debe lograr una rápida aproximación al punto de consigna y un mínimo rebasamiento de la variable manipulada. Este criterio se convierte en una función objetivo que debe hacerse mínima.

El controlador debe diseñarse de tal forma que satisfaga la llamada *ley de control*, es decir, debe cumplirse que la señal de salida del controlador haga mínima la función objetivo y que los resultados sean óptimos.

Sea el control de realimentación de la figura 9.101. El sistema está definido por la ecuación de estado:

$$\dot{X}(t) = A \times X(t) + B \times U(t)$$

$$\dot{Y}(t) = C \times X(t)$$

que representa un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales que describen la dinámica del sistema, siendo:

$\dot{X}(t)$ = vector de derivadas de las variables de estado de orden n

A, B, C = matrices de coeficientes constantes

$X(t)$ = vector matriz de las variables de estado X de orden n

$U(t)$ = matriz de entradas al sistema

El criterio más empleado es el de la mínima variancia expresado mediante el índice de funcionamiento (*performance index*) siguiente, que representa el cuadrado del error y que hay que minimizar.

$$Jmv = E\left[\left[yd - y(k)\right]^2\right]$$

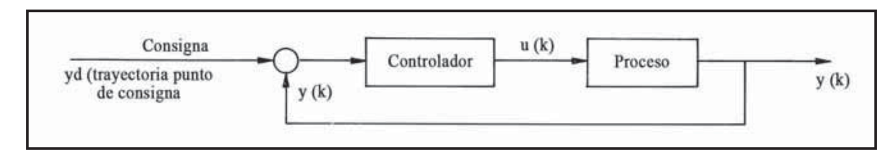


Figura 9.101 Control óptimo

en la que:

yd = valor de seguimiento del punto de consigna con relación a una trayectoria de referencia

$y(k)$ = valor de salida del controlador que hace posible la minimización de Jmv

Para tener en cuenta el período de muestreo de la señal $u(k)$, el criterio anterior se cambia a:

$$Jlc = E\left[\left[yd - y(k)\right]^2 + u(k)^2\right]$$

La *ley de control óptima* queda pues definida determinando la señal de salida del controlador $u(k)$ que haga mínimo el índice Jlc, es decir, resolviendo la ecuación:

$$\frac{\delta Jlc}{\delta u(k)} = 0$$

Para ello pueden usarse las técnicas de programación dinámicas digitales que buscan el mínimo valor de la ecuación.

Ejemplo de control óptimo

Un separador gas líquido separa las dos fases gas-líquido por medio de una fuerza centrífuga en la que el líquido más pesado se recoge en el fondo y el gas más ligero va a la parte superior. El rendimiento del separador depende del diseño del control óptimo para minimizar la dinámica de la válvula de control de líquido, y de la implementación de un control adaptativo en el controlador.

El modelo matemático que representa el sistema engloba el nivel de líquido (LT) y la presión (PT) en el separador y las posiciones de la válvula en el control del líquido (LCV) y del gas (GCV). El nivel del líquido depende de la válvula de control LCV o de la presurización indirecta en el separador que depende de la válvula de gas (GCV). A su vez, la presión depende de la existente en el interior del separador (GLCC) mediante la operación directa de la válvula de control GCV.

La estrategia de control óptimo puede realizarse entre otros, como el modelo: control óptimo con el controlador de caudal de gas como el controlador maestro (válvula GCV) con el objetivo de minimizar la dinámica de la válvula LCV, aparte de hacer mínima la presión y maximizar el caudal de gas. En el diagrama de bloques de la figura puede verse la estrategia adoptada.

El controlador maestro (primario) mide el nivel de líquido mediante un transmisor de presión diferencial (LT) y opera la válvula GCV, cuya posición entra como señal en el controlador secundario (esclavo). Éste actúa sobre la válvula de líquido LCV. La posición óptima de GCV reduce la dinámica de LCV y proporciona una baja pérdida de carga a través de LCV. Esta posición óptima es el punto de consigna del controlador secundario LCV. Si la válvula GCV se aparta de la posición óptima, el controlador secundario actúa sobre LCV para retornar GCV a su posición óptima.

El lazo de control maestro está formado por la válvula de control de gas (GCV), un transmisor de presión diferencial del nivel del líquido (LT) y un controlador *PID*. El objetivo del lazo de control

maestro es mantener el nivel en su punto de consigna, mientras que el lazo de control secundario consta de la válvula de control de líquido LCV, el sensor de posición de la válvula de control de gas GCV y un controlador *PID*. El sensor de posición de la válvula de control de gas envía una señal al controlador *PID* que actúa sobre la válvula LCV.

El objetivo principal de esta estrategia de control es mantener el nivel del líquido con la mínima presión en el interior del separador mediante la operación suave de la válvula de control de nivel LCV.

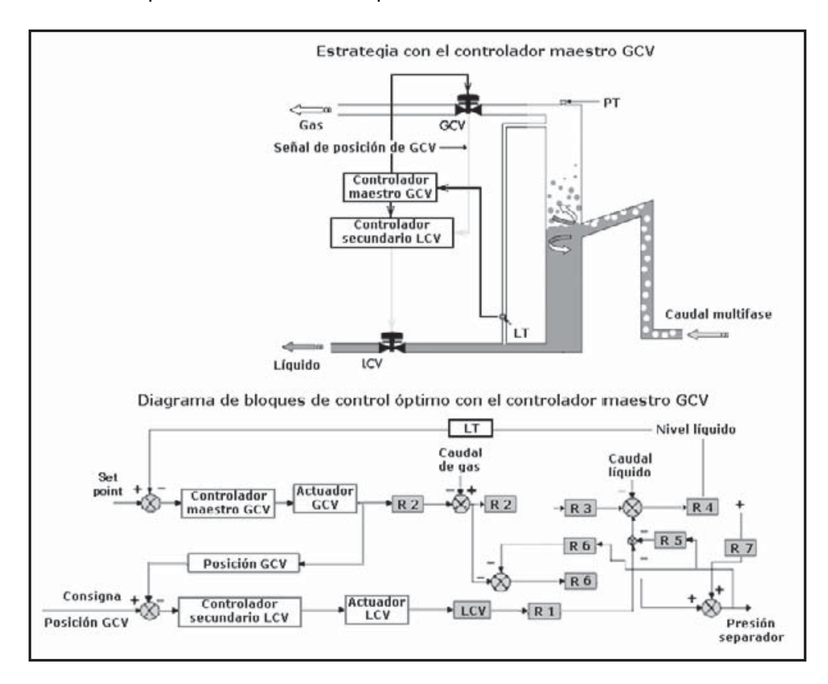


Figura 9.102 Control óptimo de un separador cilíndrico gas-líquido

9.13.8 Control adaptativo

En la búsqueda de la solución al control de procesos no lineales que el controlador clásico *PID* no resuelve satisfactoriamente, aparece, a partir de 1970, el *control adaptativo*. Un sistema de control adaptativo ajusta automáticamente sus parámetros para compensar los cambios que puedan producirse en el proceso, es decir, el sistema de control es "adaptado" al proceso. El control adaptativo permite, en los procesos no lineales tal como el de pH, ajustar las acciones *PID* a los parámetros del proceso cuando éste cambia con frecuencia de condiciones de trabajo. Los sistemas adaptativos son básicamente no lineales.

En la figura 9.103 puede verse un sistema adaptativo de *modelo de referencia (MRAS)* que indica la forma en que debe responder la señal de salida del proceso ante una consigna dada. Existen dos lazos de control en el diagrama de bloques: un lazo interno, formado por el proceso y el controlador, y el lazo externo. Este último hace que el error $e(k) = y(k) - y_m(k)$ entre la salida del proceso y la salida del modelo sea pequeño. El problema principal es conseguir que el mecanismo de ajuste de los parámetros dé lugar a un sistema estable que haga tender el error a cero. La estimación en tiempo real de los parámetros puede efectuarse por el método de los mínimos cuadrados.

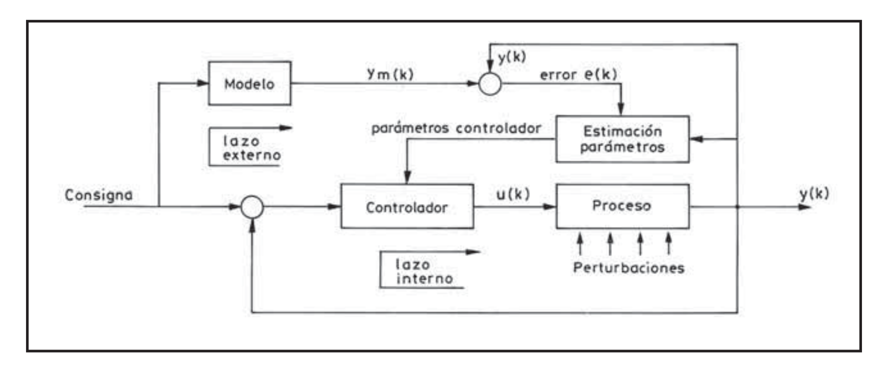


Figura 9.103 Control adaptativo de modelo de referencia

Sea un proceso de ecuación diferencial:

$$y(k+1) = y(k) + u(k) \tag{1}$$

Y con el modelo de referencia de ecuación:

$$\hat{y}(k+1) = \hat{\theta}(y(k)) + u(k) \tag{2}$$

donde:

θ = parámetro desconocido

$\hat{\theta}$ = estimado de θ

$\hat{y}(k+1)$ = valor predictivo o asumido de la señal de salida en la muestra $k+1$ y basado en la estimada $\hat{\theta}$

La función de mínimos cuadrados es:

$$v(t) = \frac{1}{2}\sum_{k=0}^{t} e^2(k) = \frac{1}{2}\sum_{k=0}^{t}\left[y(k) - \hat{y}(k)\right] = \frac{1}{2}\sum_{k=0}^{t}\left[\theta \times y(k-1) - \hat{\theta} \times y(k-1)\right] = \frac{1}{2}\sum_{k=0}^{t}\left[y(k) - u(k-1) - \hat{\theta} \times y(k-1)\right]$$

Derivando $v(t)$ con relación a $\hat{\theta}$ tenemos la estimación de mínimos cuadrados:

$$\hat{\theta}(t) = \frac{\sum_{k=0}^{t} y(k) \times \left[y(k+1) - u(k)\right]}{\sum_{k=0}^{t-1} y^2(k)}$$

De este modo, la estimada $\hat{\theta}(t)$ minimiza la ecuación (2) suponiendo que el proceso esté representado por la ecuación (1).

Otro tipo de control adaptativo es el *controlador autosintonizable* o *STR* (*Self Tuning Regulator*) representado en la figura 9.104. El sistema actualiza en cada muestreo la estimación de parámetros y el cálculo del controlador, es decir, el controlador ajusta sus propios parámetros y, de este modo, el controlador con sus propios parámetros ajustados obtiene las propiedades deseadas en el sistema de lazo cerrado.

Para que la estimación de parámetros sea correcta es conveniente introducir señales perturbadoras de un nivel mínimo determinado.

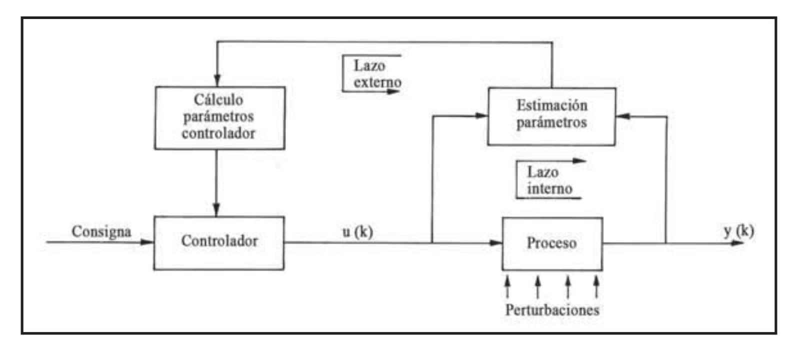


Figura 9.104 Control adaptativo autosintonizable

Sea un proceso de ecuación diferencial:

$$y(k + 1) = ay(k) + bu(k) + r(k + 1) + cr(k) \quad (3)$$

donde $r(k)$ es una ecuación de variables aleatorias.

En la muestra k, la variable aleatoria $r(k + 1)$ es independiente de $y(k)$, $u(k)$ y $r(k)$. Entonces, la señal de salida $y(k)$ es conocida y la señal $u(k)$ es calculable. De este modo, las variables aleatorias $r(k)$ pueden calcularse a partir de las entradas y salidas pasadas. Para que la variancia de $y(k + 1)$ sea lo más pequeña posible, conviene seleccionar $u(k)$ de tal forma que se anulen los términos $ay(k)$, $bu(k)$ y $cr(k)$. Tenemos pues:

$$u(k) = -\theta y(k) = -\frac{c+a}{b} y(k)$$

como expresión que relaciona la entrada y la salida al proceso. θ es un parámetro desconocido. $u(k)$ hace mínima la variancia de la señal de salida. En estas condiciones, la señal de salida vale:

$$y(k) = r(k)$$

como la ecuación del proceso viene definida por tres parámetros, es necesario identificarlos. Como la retroalimentación está caracterizada por un solo parámetro:

$$\theta = \frac{c+a}{b}$$

Puede obtenerse un controlador autoajustable que estime este parámetro, basándose en el modelo:

$$y(k + 1) = \theta y(k) + u(k)$$

La estimación de θ por el método de los mínimos cuadrados viene dada por:

$$u(k) = -\theta(k) \times y(k)$$

Los parámetros del controlador pueden obtenerse directa o indirectamente (algoritmos directo e indirecto). Los métodos indirectos se llaman a veces explícitos, indicando que los parámetros del proceso han sido estimados. Los métodos directos se han llamado a veces implícitos.

A señalar que el control adaptativo puede tener problemas de estabilidad. En el control adaptativo de modelo de referencia, y tal como puede apreciarse en el diagrama de bloques, las perturbaciones

que puedan entrar en el proceso no pasan por el modelo. De este modo, si el controlador no es capaz de compensarlas, el proceso empieza a desviarse del punto de consigna deseado y el operario se ve obligado a intervenir.

Algo parecido ocurre en el control adaptativo autosintonizable (STR), donde el bloque de estimación de parámetros capta la influencia de las perturbaciones sólo desde el lado de la señal de salida del sistema. Por otro lado, como el estimador de parámetros trabaja en lazo cerrado, si el lazo del controlador trabaja siempre correctamente, no se podrá modelizar adecuadamente el proceso.

Existe, en el mercado, una cantidad considerable de controladores adaptativos. Algunos generan automáticamente una señal de ensayo de perturbación (ciclos de pulsos de altura seleccionada), estiman el modelo del proceso y calculan los parámetros del controlador *PID* a partir del modelo. Otros analizan la respuesta del proceso controlado cuando se cambia la consigna, o cambian las condiciones de trabajo del proceso, y utilizan una técnica en lazo cerrado similar a la propuesta por Ziegler & Nichols. El cálculo de los parámetros tiende a lograr el mismo rebasamiento y amortiguamiento que el operador desea en la respuesta.

Otros modelos están adaptados al control distribuido y se basan en la estimación de mínimos cuadrados y en la variancia mínima.

Existen también controladores adaptativos expertos que se adaptan a la dinámica del proceso y del entorno y en los que se usa un índice de comportamiento del proceso. Si éste cambia de características, el controlador se adapta, excepto en el caso de que el modelo del proceso se considere infiable, y entonces se usa el índice relacionado con el pasado del proceso para realizar los ajustes.

Si bien existen muchos lazos con control adaptativo, el control adaptativo no es una panacea. Requiere una buena combinación con otros sistemas de control y una buena interfase hombre-máquina y, tal como se ha indicado, tiene problemas de estabilidad.

En el ejemplo del separador gas líquido del control óptimo de la figura 9.102, las variaciones bruscas de la mezcla líquido-gas en la entrada pueden dar lugar a cambios bruscos en el nivel del líquido, lo que puede afectar al controlador convencional *PID*.

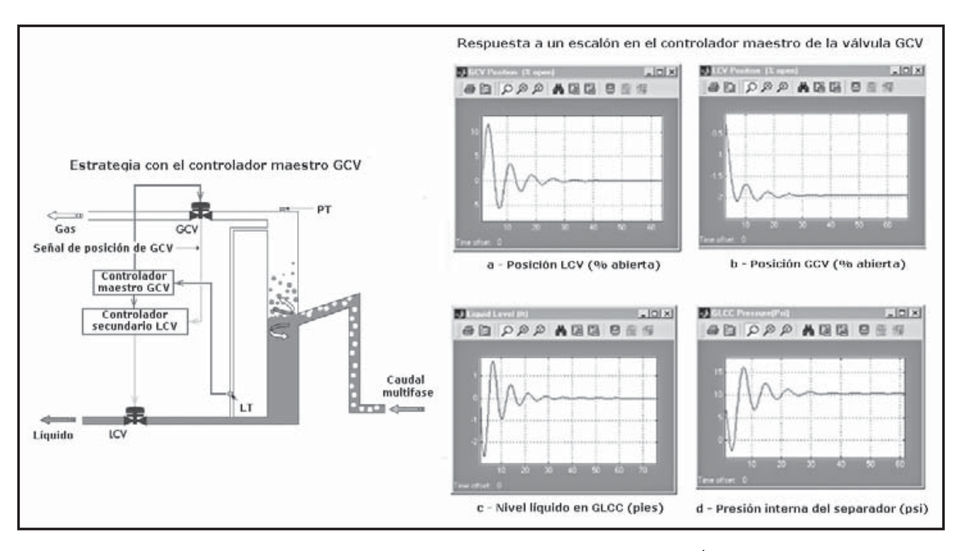


Figura 9.105 Control adaptativo del separador gas líquido

El sistema puede mejorar añadiendo un algoritmo de control adaptativo que ajuste los parámetros *PID* del controlador según la dinámica de la variable de proceso. El control adaptativo analiza la respuesta transitoria a un pico de perturbación en la variable (nivel) y el algoritmo compara los parámetros *PID* de entrada con el pico, el rebasamiento y el amortiguamiento de la variable con relación al punto de consigna. Si la relación de amortiguación y los valores del rebasamiento calculados a partir de los transitorios del proceso superan los valores introducidos por el usuario, el sistema calcula los nuevos valores *PID* y los introduce en el controlador.

9.13.9 Control predictivo

El *control predictivo* está basado en el uso de modelos dinámicos del proceso establecidos, de tal forma, que permiten anticiparse y predecir las situaciones futuras del proceso, con el objeto de utilizar esta información para modificar la estrategia actual del control. En cierta forma, se comporta igual que un operario con experiencia que, a la vista de los datos pasados y los actuales, actúa sobre el elemento final de control con el fin de obtener valores futuros de la variable controlada.

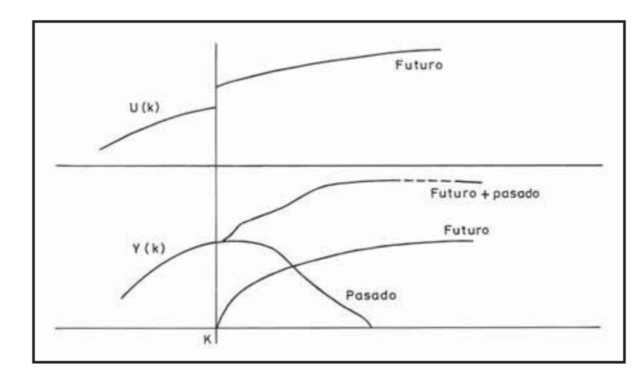


Figura 9.106 Representación gráfica del control predictivo

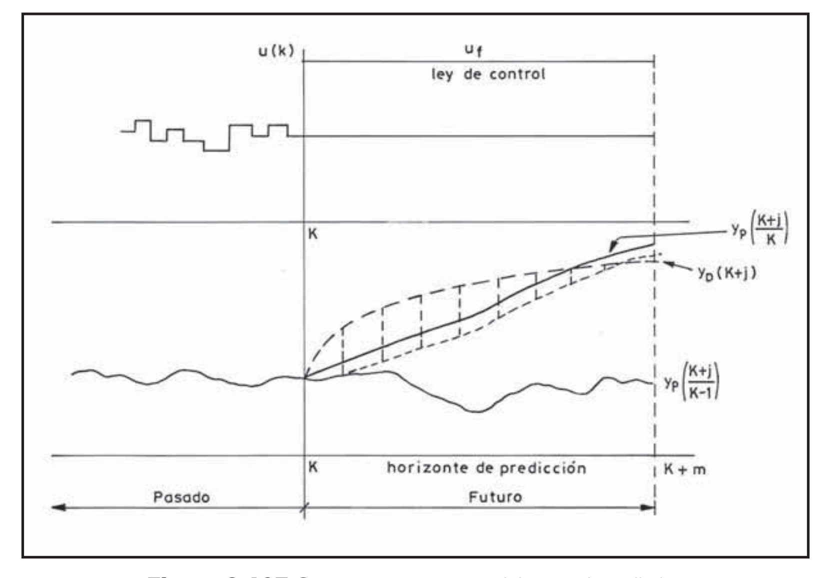


Figura 9.107 Curvas componentes del control predictivo

El control predictivo aparece en la década de los años 80, y el controlador trabaja como un inverso del modelo del proceso (modelo lineal) siendo capaz, por su robustez, de solucionar el control de la mayoría de los procesos no lineales. Siendo la señal de salida general de un proceso en el instante k de:

$$y(k) = \sum_{i=1}^{n} ai \times U(k-i)$$

La salida prevista en el instante futuro $k + m$ para una entrada impulsional es:

$$\widehat{y}(k+m) = \underbrace{\sum_{i=1}^{k} ai \times U(k-i)}_{\text{pasado}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{k+m} ai \times U(k+m-i)}_{\text{futuro}}$$

La interpretación gráfica puede verse en la figura 9.106, y las curvas correspondientes en la figura 9.107.

Para simplificar el estudio consideramos que los valores de $u(k)$ desde el instante k hasta el instante $k + m$ son constantes e iguales a U_f. De este modo, la señal de salida prevista de $y(k + m)$ con relación a la $y(k)$ es:

$$\widehat{y}\left(\frac{k+m}{k}\right) = \underbrace{\sum_{i=1}^{n} ai \times U(k-i)}_{\text{pasado}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{k+m} ai \times U_f}_{\text{futuro}}$$

El objetivo es que la predicción en el instante $k + m$ sea igual al valor deseado. Luego U_f debe satisfacer la condición:

$$U_f = \frac{\left[yd(k+m) - \sum_{i=1}^{k} ai \times u(k-i) \right]}{\sum aj}$$

La ley de control generará la predicción $yp[(k + j)/k]$ y corresponderá a los valores de la señal de salida del controlador que hagan mínima la función objetivo del error de predicción:

$$\sum \left[yd(k+j) - yp(k+j) \right]^2$$

a lo largo del horizonte de predicción.

Una vez calculada la predicción, en el siguiente intervalo de muestreo, el valor real diferirá normalmente de la predicción establecida, con lo que hay que realizar una nueva corrección en el horizonte de predicción. Una vez efectuada la corrección se calcula nuevamente la ley de control y se procede, repetidamente, con las secuencias indicadas.

El sistema, pues, procede de modo dinámico realizando los cálculos anteriores en todo el horizonte de predicción.

En la figura 9.108 puede verse el diagrama de bloques del control predictivo. Sin duda, la aplicación del control predictivo comporta unos recursos humanos y tecnológicos importantes, por lo que será necesario aplicar criterios de evaluación que permitan fundamentar la decisión en su aplicación.

Entre los mismos figuran:

- Control complejo con perturbaciones considerables y dinámica cambiante.
- Proceso altamente no lineal, multivariable y con restricciones.
- Retardos importantes.
- Robustez deseable.

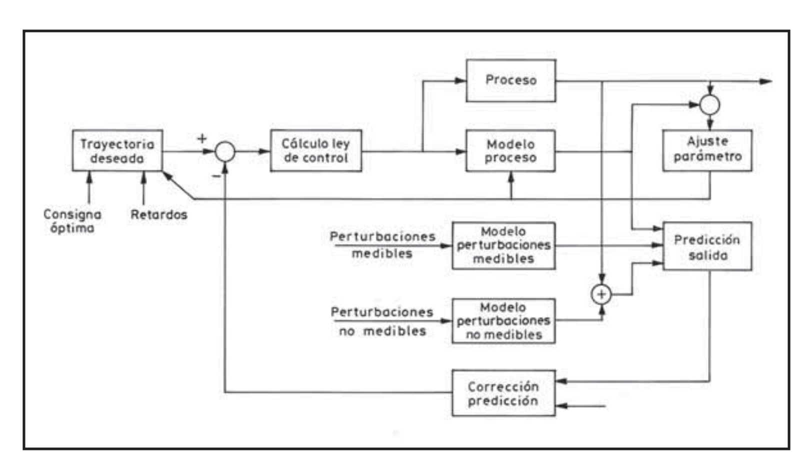


Figura 9.108 *Diagrama de bloques del control predictivo*

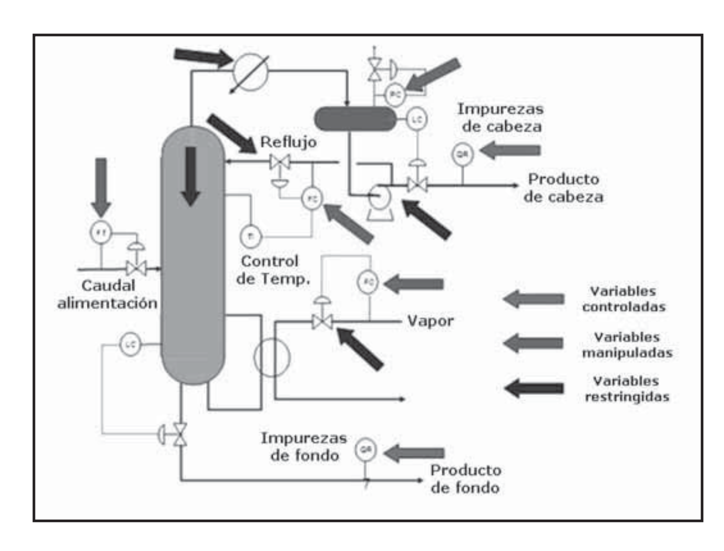


Figura 9.109 *Variables controladas, manipuladas y restringidas de una columna de destilación. Fuente: Emerson*

Como ejemplo de los beneficios del control predictivo en una columna de destilación (figura 9.109), los operadores han confiado en el sistema predictivo el 90% del tiempo en lugar de estar atentos al proceso el 100% del tiempo como en la columna tradicional y el ingeniero de proceso ha comprobado que el reflujo se ha visto reducido en un 20% y un ahorro de 400 Kg/h de vapor. Todo ello con el producto dentro de especificaciones.

9.13.10 Sistemas expertos

Los *sistemas expertos* se integran en el sistema de control de la planta para asistir al operador en la detección y en la solución de los casos en que el proceso sale fuera de control. El sistema experto contiene una base de conocimientos extraída de expertos, de tal forma que detecta y diagnostica los problemas potenciales que pueden presentarse en el control de procesos de una planta industrial, pudiendo tomar decisiones inteligentes y justificar su mecanismo de razonamiento de una forma inteligible.

En la figura 9.110 puede verse la arquitectura de un sistema experto *on-line*.

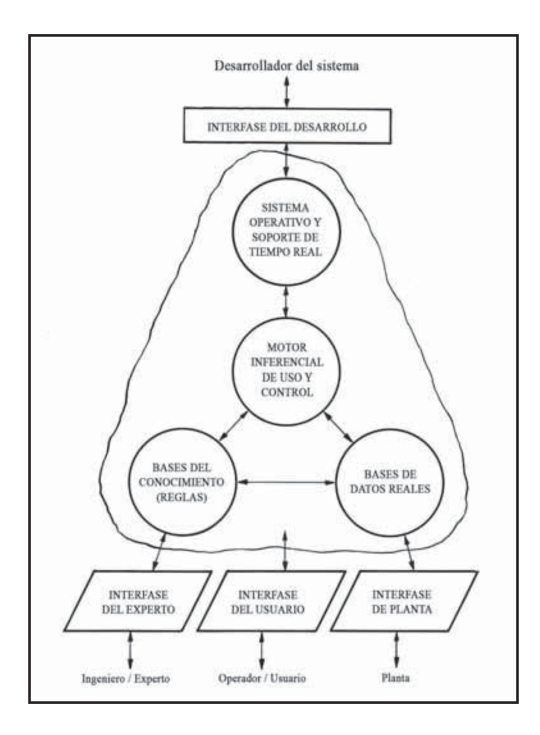


Figura 9.110 Componentes del sistema experto

La elaboración del "paquete experto" es laboriosa. Es necesario adquirir el conocimiento que, del proceso, disponen los operadores de la planta y los ingenieros proyectistas, para incorporarlo al sistema experto. Este conocimiento se basa, fundamentalmente, en las señales de alarma que el operador humano capta antes de presentarse las situaciones anómalas en el proceso que dan lugar a toda clase de fenómenos perjudiciales como son: paro de la planta, destrucción del producto, explosiones, desprendimientos de productos peligrosos, etc. Para la elaboración de las bases del conocimiento se hace un uso amplio de pantallas y menús que permiten al usuario, sin tener experiencia en sistemas expertos, y con la ayuda del programa, construir los modelos del proceso, entrar los parámetros del sistema, especificar las variables críticas y otros datos del conocimiento.

El sistema experto también debe incorporar las operaciones necesarias para solucionar correctamente las situaciones anómalas del proceso y debe ser capaz de manejar, en tiempo real, grandes cantidades de datos del proceso y a diferentes niveles de prioridad.

El diseño de los diagramas de flujo y las configuraciones del control de la planta (presentaciones visuales, procesos simulados) requieren trabajar con un lenguaje de programación que permita al proyectista una gran versatilidad. Se utilizan las estaciones de trabajo en LISP (o en PROLOG) complementadas por herramientas de cálculo numérico que utilicen FORTRAN, PASCAL o C. De este modo, estas estaciones permiten la obtención del conocimiento cualitativo y cuantitativo que exige el sistema experto.

En general, un sistema experto dispone de:

a) *Base de conocimientos del proceso* que puede estar representada de varias formas: reglas de producción, lógica de predicados, redes semánticas, marcos y restricciones.

   En las reglas de producción, la estrategia de búsqueda para producir el conocimiento demandado tiene lugar con un encadenamiento hacia atrás o hacia adelante de los diferentes árboles de decisión, proporcionando por diagnóstico y predicción una o varias conclusiones con un determinado factor de certeza que indica el grado de certeza con el que se cree que cada regla o hecho es verdadero. Es decir, a cada regla se le asocia un valor de credibilidad a la conclusión.

   Las reglas utilizan profusamente la sentencia *IF-THEN*. Por ejemplo, en un reactor exotérmico, se utilizaría:

   IF (la reacción es exotérmica) *AND* (el próximo paso de la reacción es bajar la temperatura) *THEN* (actúa (cerrando) la válvula de vapor de control de temperatura del intercambiador de calor del proceso).

b) Un *motor de inferencia* que controla y usa las bases del conocimiento del proceso (que contienen las reglas y la base de hechos), realizando una serie de razonamientos sobre la información y uso por parte del usuario en la comprobación o ampliación del sistema y en la deducción de conclusiones.

c) *Sistema de explicación* que lista las reglas que se utilizaron durante la ejecución, explicando el razonamiento empleado para información y uso por parte del usuario en la comprobación o ampliación del sistema.

Las etapas típicas con las que actúa un sistema experto en la planta son las siguientes:

a) *Reconocimiento de las situaciones anómalas*. Se realiza mediante la monitorización de todos los sistemas de control analógicos y digitales, tales como los controladores, alarmas, indicadores y registradores.

b) Su *comparación* con los datos provenientes del conocimiento del sistema experto.

c) *Diagnóstico*. Se efectúa a partir de la fase anterior de comparación si, en la misma, se han detectado situaciones problema. Se visualiza el diagnóstico de la planta en el estado actual de control.

d) *Corrección del problema*. El operador es asistido por el sistema inteligente de visualización que le muestra gráficamente los diagramas de flujo de interés, el resumen de alarmas, el estado de los indicadores y controladores afectados, y la secuencia de operaciones a realizar para atajar y solucionar el problema. En base a la información recibida, el operador actúa sobre el proceso, o bien puede hacerse que eventualmente, esta actuación sea realizada automáticamente por el sistema de control, informando al operador de las acciones realizadas.

Entre las aplicaciones típicas que estos sistemas expertos pueden realizar se incluyen el control de nivel del fondo y la optimización del rendimiento en destilado de las columnas de destilación.

El beneficio que el sistema experto aporta a la planta es la reducción de los tiempos de paro y, lo que es más importante, disminuye la probabilidad de que el funcionamiento anómalo de la planta conduzca a situaciones catastróficas.

9.13.11 Control por redes neuronales

Es una forma de control que imita el funcionamiento de las neuronas del sistema nervioso. La red neuronal puede aprender y ser un sistema experto que extraiga datos automáticamente sin precisar de reglas. La forman un conjunto de elementos, las neuronas, que están conectadas entre sí en una forma semejante a la del cerebro humano. La señal procedente de las diversas entradas o “dendritas" genera excitación en la salida o “axón” de la neurona, siempre que se sobrepase un determinado umbral de carácter bioquímico. Cada conexión neuronal (*sinapsis*) entre las salidas de unas neuronas (axones) y las entradas de otras neuronas (dendritas), se caracteriza por un valor llamado *peso* que puede ser excitador (positivo) o inhibidor (negativo) del elemento del proceso. La excitación positiva o negativa depende de múltiples factores tales como el pH, la hipoxia, los medicamentos, el sueño, la vigilia, etc. En la figura 9.111 puede verse la estructura de las neuronas.

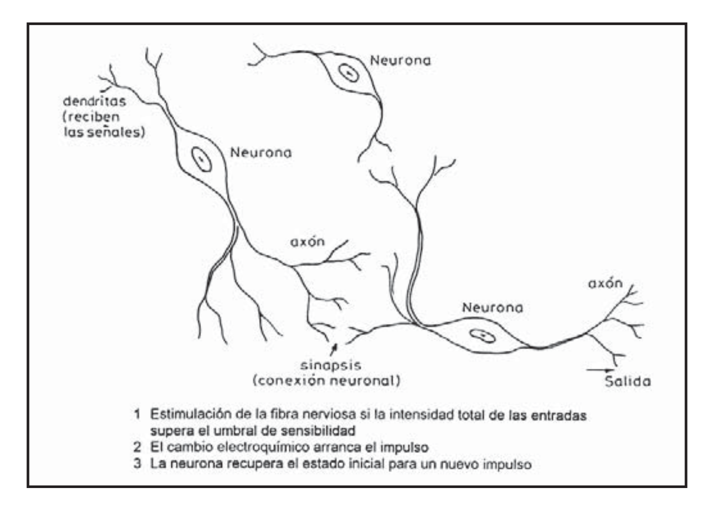


Figura 9.111 Neurona

Al ser excitada, la neurona experimenta los fenómenos siguientes:

1. Estimulación de la fibra nerviosa si la intensidad total de las entradas supera el umbral de sensibilidad.
2. El cambio electroquímico arranca el impulso.
3. La neurona recupera el estado inicial lista para un nuevo impulso.

Cada neurona suma los pesos de las demás neuronas que la estimulan y el resultado de la suma recibe el nombre de *función de activación* (funciones sigmoide unipolar y bipolar, tangentes hiperbólica y lineal). Cuando los ajustes de pesos se realizan desde las capas precedentes, se usa el término *propagación de retroceso*. Las redes neuronales pueden distribuirse en *capas* (de *entrada*, *ocultas* y de *salida*) conectadas entre sí hacia adelante o en conexionado total (cada salida de una capa pasa a través de cada nodo en la siguiente capa). El algoritmo de retropropagación del error presenta repetidamente los datos de entrada a la red neuronal. En cada presentación, la salida de

la red neuronal se compara con la salida deseada y el posible error se retroalimenta a la red ajustando los pesos de las neuronas, de tal modo que el error disminuye en cada iteración y el modelo neuronal se aproxima cada vez más a la salida deseada. Este proceso se denomina "aprendizaje".

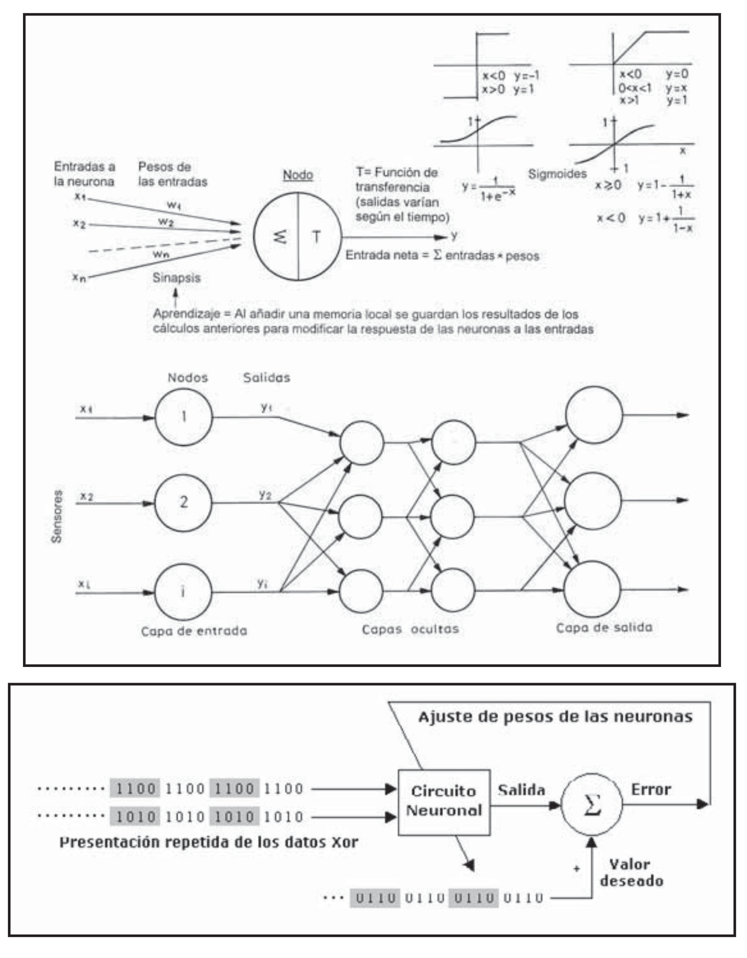


Figura 9.112 *Esquema de una red neuronal*

De este modo, puede simularse cualquier proceso mediante la aplicación de arquitecturas neuronales, siempre que se tenga la información sobre la entrada y salida del proceso. En la figura 9.112 puede verse un esquema de la red neuronal y el circuito de retropropagación que permite el aprendizaje.

La capa oculta transforma de modo no lineal las entradas, de modo que con una sola capa oculta puede representarse cualquier proceso, sea cual sea su complejidad.

El mecanismo de autoaprendizaje usa el algoritmo de retropropagación generalizado perfeccionado, basado en la *regla delta generalizada* o *algoritmo de entrenamiento de retropropagación del error* que modifica las intensidades de las conexiones para minimizar las desviaciones cuadráticas de la salida deseada con relación a la salida normal.

La reducción del error se efectúa en dos fases; en la primera se calcula el error y en la segunda el cálculo del error se realiza en la dirección retrógrada mediante un método iterativo que busca minimizar una función formada por la suma instantánea de los errores cuadráticos. De este modo, se calculan las salidas de las neuronas de la primera capa, posteriormente las salidas de las capas ocultas y, por último, las salidas de las neuronas de las capas de salida. Se inicia entonces la fase de actualización de los pesos.

El *controlador neuronal predictivo* (figura 9.113) se diseña de forma parecida a los controladores predictivos, estableciendo la trayectoria dinámica de referencia, el horizonte de predicción y la ley de control, con la diferencia importante que la relación lineal, entre la influencia del pasado y del futuro, depende directamente de la no linealidad del proceso.

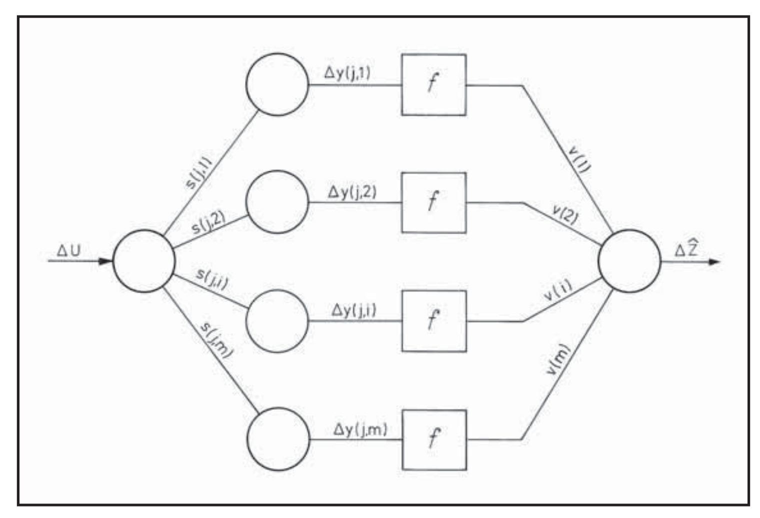


Figura 9.113 Modelo neuronal predictivo

Las señales de salida son:

$$Z\,[(k+j)/k] = Zo + \Delta Z\,[(k+j)/k]$$

$$y\,[(k+j)/k] = y\,[(k+j)/(k+1)] + \Delta y\,[(k+j)/k]$$

$$\Delta Z\,[(k+j)/k)] = \Sigma\, v(p) \times f\,[y\,[(k+j)/k]] + \Sigma\, s(j,i) \times \Delta U(k)$$

La ley de control $\Delta U(k)$ permite optimizar la función objetivo:

$$\theta = \Sigma\,(Z\,(k+j) - Z\,(k+j))^2$$

En el horizonte de predicción, que hacen mínima la predicción de errores

$$\hat{e}\,[(k+j)/k] = \Sigma\, q(t) \times f\,[p(j,i),\, e(k)]$$

Entre las características básicas del controlador neuronal predictivo se incluyen:

- Autoexperiencia y aprendizaje.
- Basado en el perceptron multicapa con funciones de transferencia tipo sigmoide.
- El mecanismo de autoaprendizaje minimiza una función objetivo por el algoritmo de retropropagación del error mediante derivaciones sucesivas de la función objetivo.

- El coeficiente α de la función sigmoide es el único parámetro de ajuste e influye en la velocidad de autoaprendizaje.

Una aproximación al controlador *PID* para obtener una respuesta deseada de la planta puede verse en la figura (figura 9.114). Contiene un módulo generador de características a la salida de la planta que es comparado con un módulo de las respuestas deseadas. La señal de error de características alimenta un módulo de aprendizaje que cambia los valores de las acciones *PID*. La habilidad para aprender es la característica más importante del módulo de aprendizaje, y las dificultades que presenta la creación de algoritmos estimulan todavía más los trabajos en el campo del control. Una vez diseñado el sistema de aprendizaje es necesario verificarlo y validarlo.

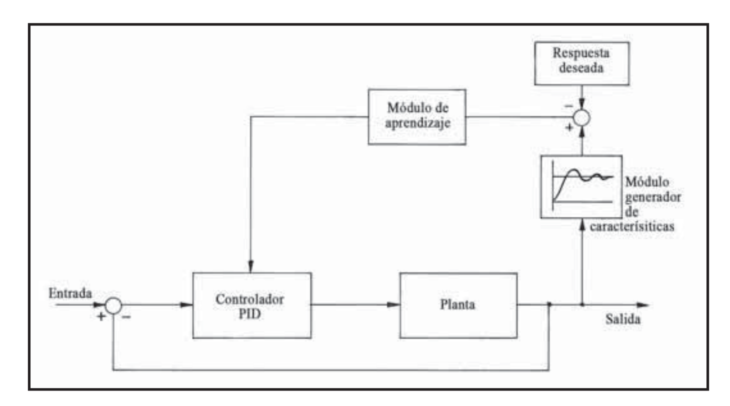


Figura 9.114 Esquema de aprendizaje del controlador PID

En la figura 9.115 puede verse un control neuronal de una columna de destilación.

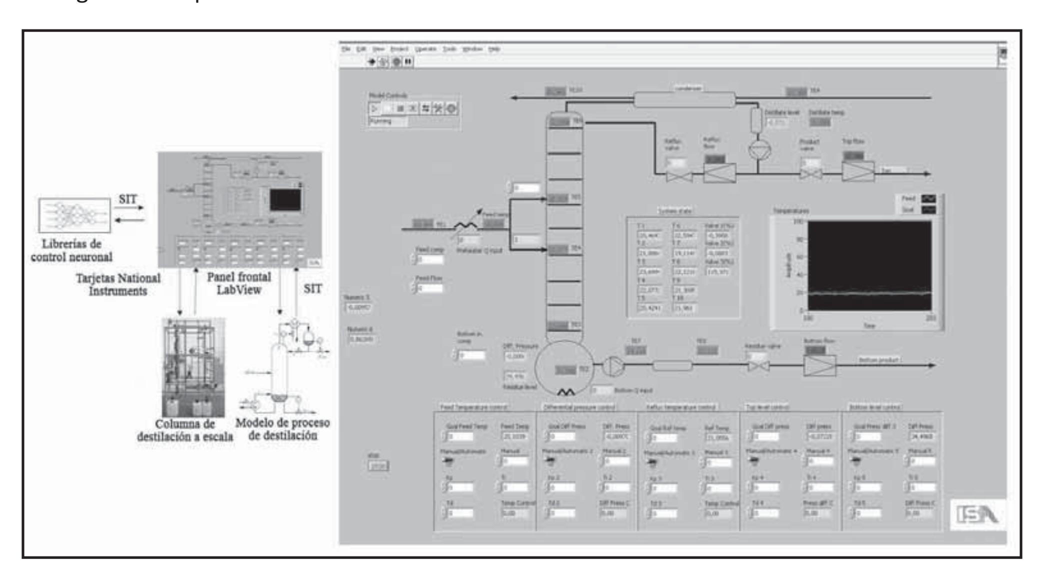


Figura 9.115 Control neuronal de una columna de destilación. Fuente: LabView

Un sistema que se presta al control por redes neuronales es el control de pH. Es difícil tener un buen control por retroalimentación con un controlador *PID*, ya que el proceso es altamente no lineal.

Mediante el modelo predictivo del proceso y el del controlador, el módulo de aprendizaje es capaz de llegar al punto de consigna en varias pruebas.

La estructura neuronal más utilizada en el control de sistemas no lineales es el *perceptrón multicapa (MLP = MultiLayer Perceptron)* o *neurona artificial*, con un algoritmo de propagación del error (figura 9.116).

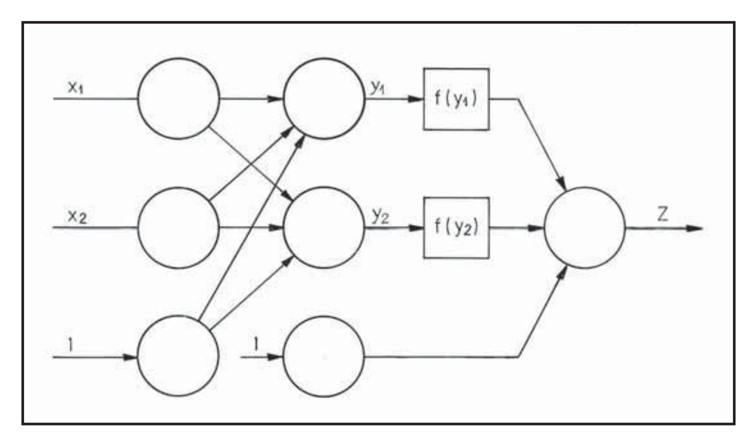


Figura 9.116 Arquitectura perceptrón multicapa

9.13.12 Control por lógica difusa

La *lógica difusa* fue desarrollada por Zadeh en 1965 y es adecuada para el control de procesos no lineales y con un comportamiento variable en el tiempo. En 1970, apareció el controlador estático por lógica difusa al que siguió, inmediatamente, el controlador adaptativo.

Mientras en el control digital la señal de salida es un conjunto de bits con dos valores o señales posibles, SI o NO, TODO o NADA, 1 o 0, la lógica difusa o borrosa utiliza operadores para describir un sistema mediante reglas. Por ejemplo, aplicada al control de temperatura de un producto, afirmaría "el producto está un poco caliente" o "algo frío", "muy caliente" o "justo lo caliente que deseamos". La lógica difusa hace mucho más humano el control, pues tiene muchos puntos en contacto con el lenguaje corriente.

Un ejemplo de pertenencia de un elemento a un conjunto dado obedece a una lógica multivaluada dentro del intervalo [0,1], es decir, que la transición entre pertenecer o no a un conjunto es gradual. Así, la lógica difusa indica, por ejemplo, que una persona (dentro del universo Y) de 1,80 m está dentro de las personas (A) comprendidas entre las de 0,5 m [0,0] y las de 2 m [1,0] en que puede dividirse la población según este particular criterio.

$$\mu : Y \rightarrow [(0,0)\ (1,0)]$$

$$\mu\ (y) = \text{grado de pertenencia de } y \text{ dentro de } A$$

Un simple instrumento muy utilizado en la industria que puede considerarse de lógica difusa es el termostato. Trabaja con dos reglas de decisión (*IF (SI) - THEN (ENTONCES)*), que pertenecen a un modelo lingüístico de proposición difusa:

(1) SI la temperatura es inferior al punto de consigna ENTONCES da calor (IF temperatura < consigna THEN contacto cerrado (da calor)).

(2) SI la temperatura es superior al punto de consigna ENTONCES no da calor (IF temperatura > consigna THEN contacto abierto (no da calor)).

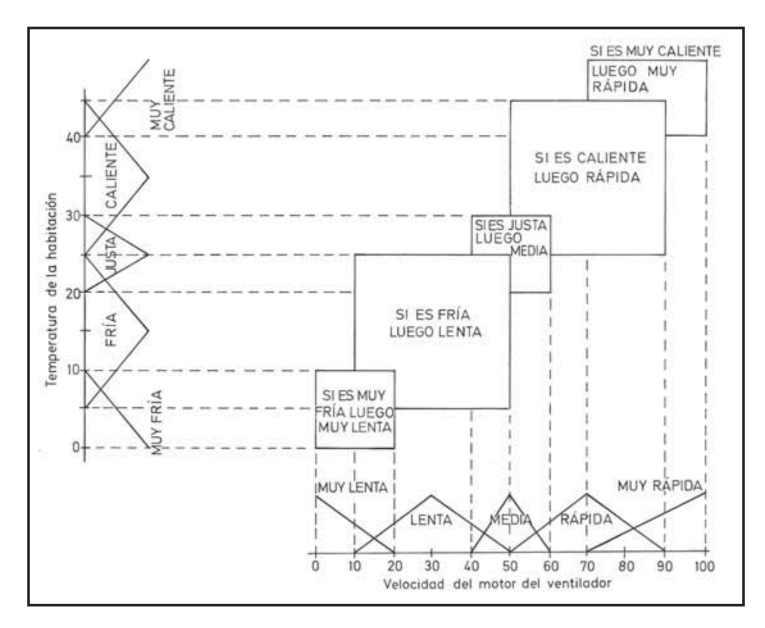


Figura 9.117 Control por lógica difusa del aire acondicionado de una habitación

En la figura 9.117 puede verse un ejemplo de control por lógica difusa. La relación que existe entre la temperatura de una habitación y las velocidades del motor del ventilador de aire acondicionado, considerando constante su temperatura.

Un algoritmo de lógica difusa que describe la respuesta de un controlador *PID* es:

IF $y(t)$ es A AND $y'(t)$ es B AND $u(t)$ es C THEN $\ddot{y}(t)$ es D

con:

$u(t)$ = señal de entrada

$y(t)$ = señal de salida

$y'(t)$ = señal de salida derivada

$\ddot{y}(t)$ = señal de salida de segunda derivada

A, B, C y D = reglas de lógica difusa de funciones $\mu(Y)$, $\mu(\dot{Y})$, $\mu(U)$, $\mu(\bar{Y})$, donde Y, $\dot{Y}$, U, $\bar{Y}$ son los universos de las variables

La regla de lógica difusa es:

$$R = A \times B \times C \times D$$

$$\mu(Y, \dot{Y}, U, \bar{Y}) = min\ \{\mu(Y), \mu(\dot{Y}), \mu(U), \mu(\bar{Y})\}$$

Y, componiendo las dos expresiones, resulta como salida del modelo:

$$y'(t + T) = R\ (u(t) \times y(t) \times y'(t))$$

Existen dos tipos de controladores en lógica difusa, los basados en reglas estáticas y los adaptativos.

Los *estáticos* trabajan minimizando una función de error en la regla:

IF e es E AND de es ΔE AND d^2e es $\Delta^2 E$ THEN du es ΔU

en la que:

e = error entre la salida del proceso y un punto de consigna deseado

de = error de la primera derivada en entre la salida del proceso y un punto de consigna deseado

d^2e = error de la segunda derivada entre la salida del proceso y un punto de consigna deseado

du = derivada de la variable controlada

$E, \Delta E, \Delta^2 E, \Delta U$ = reglas de lógica difusa

En la figura 9.118 puede verse el esquema de un controlador de lógica difusa estático. Los controladores de lógica difusa *adaptativos* aplican una regla inicial, que puede no ser conocida exactamente, y una segunda regla de adaptación a los cambios paramétricos del proceso, lo que permite un control y aprendizaje simultáneos.

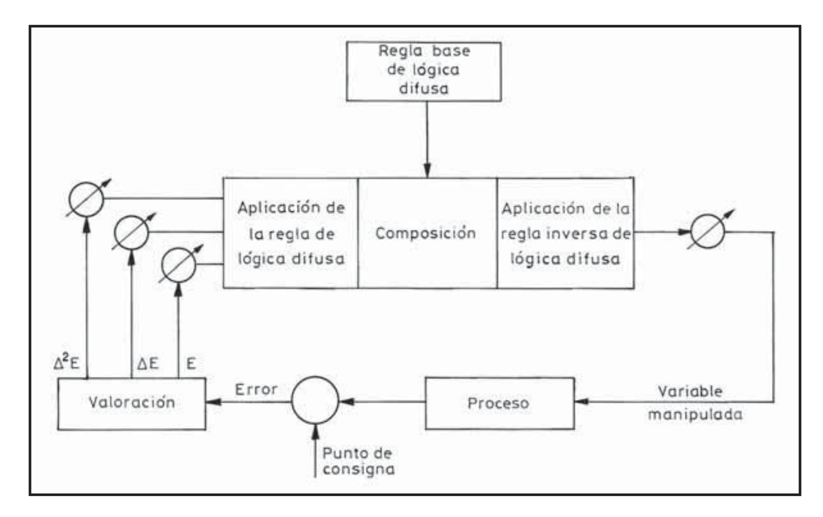


Figura 9.118 Controlador de lógica difusa estático

Existen dos niveles, el del controlador idéntico al estático descrito anteriormente, y el del nivel de adaptación que usa una tabla de comportamiento para gobernar una regla de modificación del proceso. En lugar de la tabla de comportamiento pueden utilizarse criterios de evaluación del error.

A. Mamdani combinó las ideas de los sistemas basados en reglas con el uso de parámetros difusos para construir un controlador basado en el razonamiento de un operador humano (figura 9.119). El método de razonamiento de Mamdani está basado en la superposición de las salidas de cada una de las reglas que componen el modelo difuso para una determinada entrada. La relación difusa es interpretada como una intersección de conjuntos difusos. En el control adaptativo, las reglas son:

(1) La regla inicial puede no ser conocida exactamente.

(2) Regla de adaptación a los cambios paramétricos del proceso.

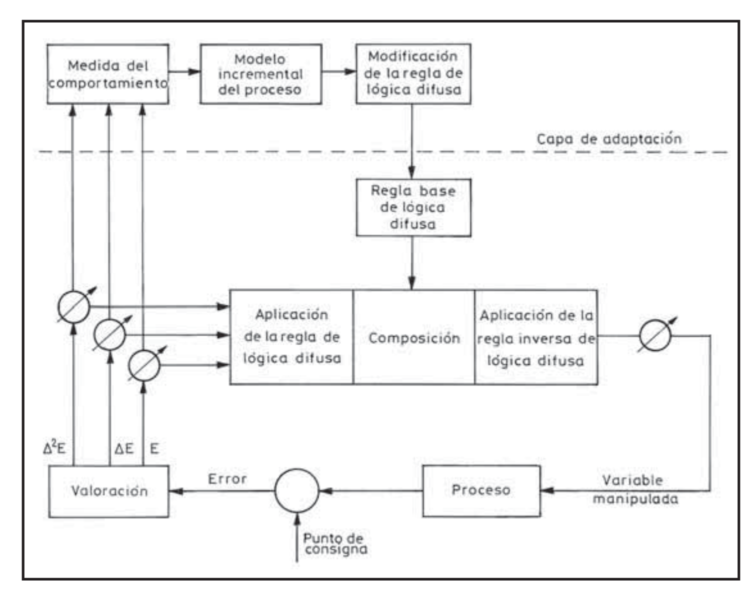


Figura 9.119 Controlador adaptativo directo de Mamdani

Existen también controladores adaptativos expertos que se adaptan a la dinámica del proceso y del entorno y en los que se usa un índice de comportamiento del proceso. Si éste cambia de características el controlador se adapta, excepto en el caso de que el modelo del proceso se considere no fiable, y entonces se usa el índice relacionado con el pasado del proceso para realizar los ajustes.

En la figura 9.120 puede verse el control por lógica difusa de un proceso de fermentación.

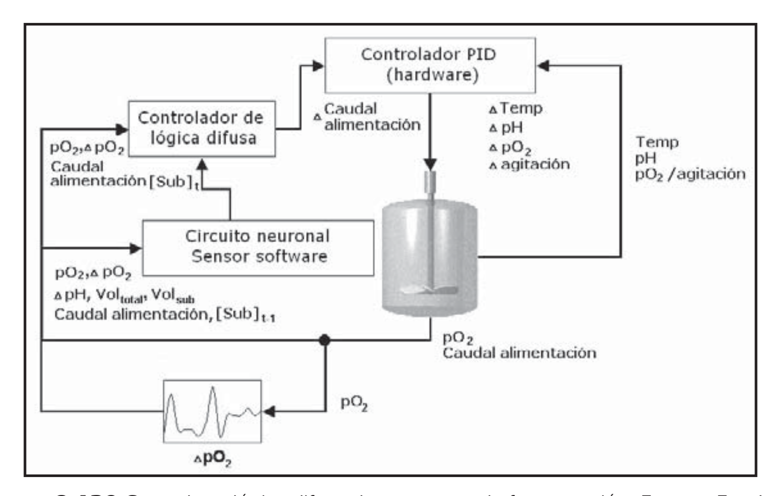


Figura 9.120 Control por lógica difusa de un reactor de fermentación. Fuente: FoxyLogic

El control por lógica difusa, aunque está siendo utilizado desde hace 20 años, todavía no está reconocido totalmente en algunos sectores del control industrial. Existe un área de solape entre el control por lógica difusa y los circuitos neuronales.

9.14 Control integrado

9.14.1 Generalidades

En los años 90, las empresas tendían a eliminar procesos innecesarios, aumentar la automatización, etc. Hoy en día, y debido principalmente a la fabricación competitiva, las tendencias son:

- Crecimiento de las aplicaciones del control avanzado.
- Aplicación continua de las tecnologías punteras.
- Aplicaciones independientes de la plataforma hardware.
- Aumento de la inteligencia en campo.
- Cambio de sistemas propietarios a abiertos. El sistema abierto es, para unos, un sistema que sigue determinado estándar. Para otros que sea "*plug & play*", es decir, insertar y trabajar. Para otros que funcione en Windows, etc. La aceptación general es que es un sistema basado en estándares públicos y sistemas genéricos (por ejemplo, el PC). Ideal que el sistema sea accesible con una base de datos y una ventana única.
- Integración del control y la información en los diferentes niveles de la planta, es decir, unir los sistemas de control del proceso con los sistemas de gestión de la información (CIM). Que el sistema de automatización sea fácil de modificar, que pueda configurarse (no programarse) y que sea una solución estándar mantenida por el proveedor. Es importante que el suministrador esté en el mercado de forma estable para que la inversión esté protegida y se cuente con su apoyo permanente.
- Control en tiempo real de las variables de gestión (costes, calidad, planificación, características y trazabilidad de productos, energía, stocks, etc.), que permita una gestión empresarial de alto nivel con una buena planificación de la fábrica y la disponibilidad de la información necesaria a dirección.
- Mejor ciclo de vida (figura 9.121). En todos los sistemas, la inversión total (incluyendo mantenimiento, expansiones, ingeniería y entrenamiento) es de 6 a 8 veces la inversión inicial. Alrededor del 70% al 80% de este coste depende de la solución de automatización adoptada, es decir, de la estrategia, del personal y del control avanzado.

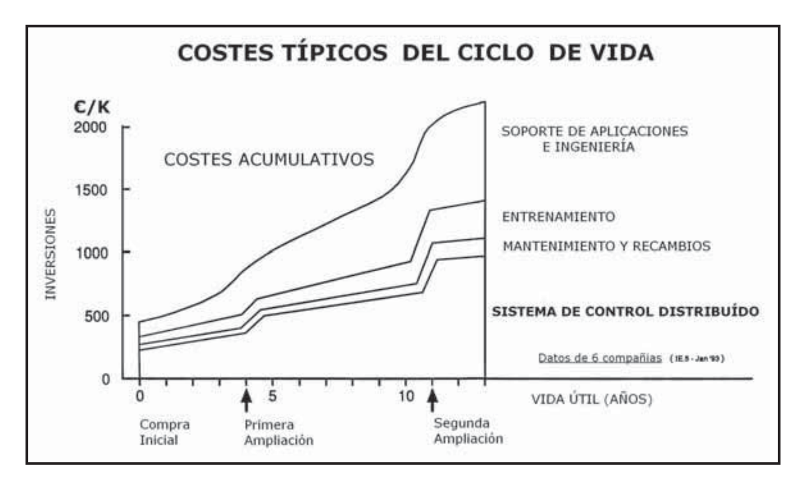


Figura 9.121 Costes del ciclo de vida

- Satisfacer las demandas de los clientes de productos de alta calidad y entrega rápida, y optimizar el periodo de retorno de sus activos de inversión mediante información adecuada en tiempo real para la toma de decisiones de la empresa.

El intercambio dinámico de datos y el estándar OLE (*Object Linking and Embeding*) permite la visión y representación de los datos del proceso mediante hojas de cálculo y esquemas reales del proceso con los datos dinámicos reales.

El sistema de información presenta, a los usuarios, la información significativa suficiente para que cada grupo pueda llevar a cabo su tarea de forma eficiente. La información de la fabricación es presentada en términos económicos siendo en general:

- Coste de mano de obra.
- Materias primas, productos fabricados y rechazos
- Consumo de energía.
- Tasa de fabricación y tendencias.
- Utilización porcentual del proceso.

De este modo, los sistemas y automatización actuales están diseñados para proporcionar una familia escalable de soluciones de control para satisfacer la mayor parte de las necesidades de automatización de los procesos industriales, teniendo en cuenta que la fabricación competitiva obliga a las empresas a efectuar una labor de control de costes, a operar desde un sistema abierto (para disponer de instrumentos de diferentes marcas sin problemas), y a unir los sistemas de control de proceso con los sistemas de gestión de la información.

El control de costes obliga por su parte a:

- Acceso en tiempo real a todos los costes unitarios de la planta: producción, mano de obra, energía, stocks, etc., es decir, no sólo los instrumentos, sino también los demás aparatos de campo, tales como bombas, motores y otros.
- Acceso en tiempo real a proceso, calidad y costes.
- Integración de todas las unidades de proceso cuyo objetivo es conseguir una información del conjunto de todos los niveles de decisión de la planta y, al mismo tiempo, tener una individualidad en cada uno de los sistemas. Así, el buen control automático de la planta permite obtener los datos y resultados necesarios para el control físico y la gestión de la producción. Por ejemplo, la logística de los pedidos de los productos exige la comunicación, en tiempo real, con la fábrica para correlacionar el inventario de productos en almacén y los nuevos pedidos juntamente con los que están en ejecución.

Un esquema de la gestión total integrada de la planta puede verse en la figura 9.122.

El *control integrado* es realmente un sistema de sistemas, es decir, considera la integración de los sistemas existentes o que puedan añadirse a una planta. Los sistemas deben estar conectados mediante una red de datos. Desde un punto de vista funcional, los principales componentes del sistema integrado son:

1. Sistema de control básico distribuido y control avanzado.
2. Sistema de captación de datos y supervisión de la operación.
3. Sistema de gestión de alarmas.
4. Sistema de gestión de laboratorio.

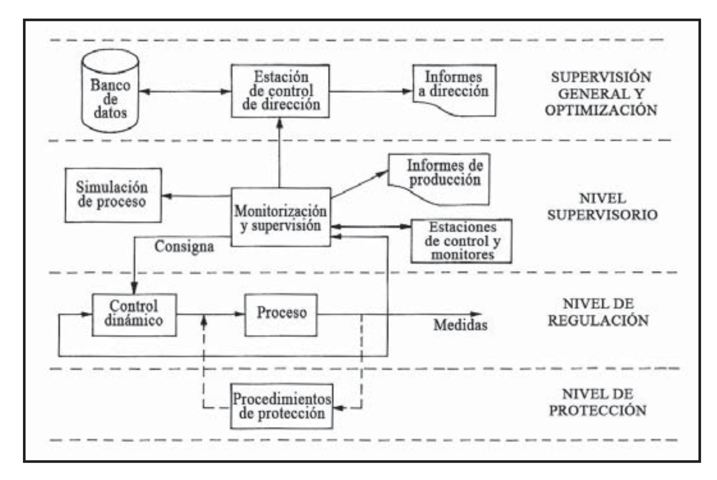


Figura 9.122 *Esquema de gestión total integrada de la planta*

5. Sistema de gestión de la producción.
6. Red de comunicaciones.
7. Interfases entre instrumentos (aparatos de diferentes marcas).
8. Sistema de gestión de seguridad de la planta.
9. Sistema de gestión de la calidad (ISO 9000:2000).
10. Software (OLE) de comunicaciones entre instrumentos.
11. Gestión de calibraciones.

Los beneficios del control integrado abarcan:

- 30% de reducción en los costes de mantenimiento.
- 1% al 4% de aumento de la producción debido a la optimización del proceso.
- 1% al 2% de disminución de los costes.
- 40% de reducción de los incidentes relacionados con el operador del proceso.
- Hasta un 50% de retorno de la inversión gracias a un aumento del ciclo de vida.

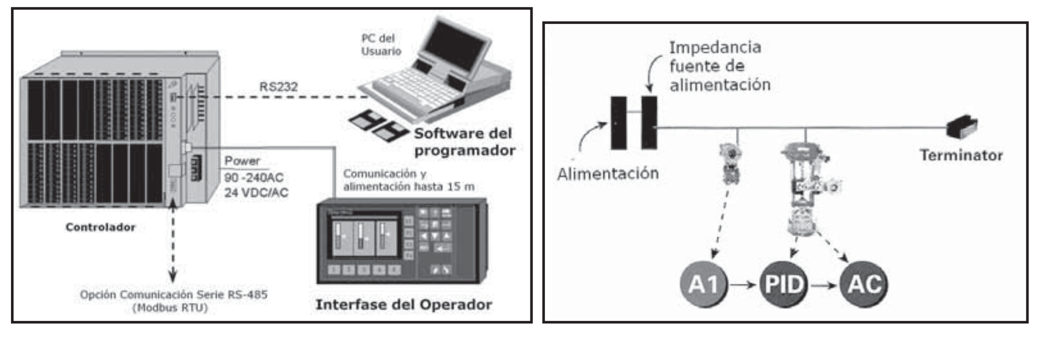
9.14.2 Sistema de control básico, control distribuido y control avanzado

En pequeñas plantas puede situarse un controlador multilazo con una estación de operador, o bien una comunicación *Foundation Fieldbus* entre instrumentos (figura 9.123).

O bien la instalación de control distribuido con las características del control (básico o regulatorio) efectuado por el operador en la sala de control que se complementa, en la mayoría de las unidades, con aplicaciones adicionales de control avanzado.

De este modo, el sistema integrado (figura 9.124) envía automáticamente, los datos y resultados por medio de vías de comunicación redundantes de tipo coaxial o de fibra óptica o por radio, allá donde se necesitan que estén disponibles inmediatamente. Por simple manipulación del teclado, se pueden variar las constantes de control (*PID*, etc.). El sistema realiza todas las funciones de la

instrumentación convencional, tales como control de las variables del proceso, alarmas, indicación y registro de las variables, curvas de tendencia y otras informaciones que estén disponibles para los operadores (históricos, tendencias y valores promedio).



a) Controlador multilazo

b) Fieldbus básico

Figura 9.123 Sistemas de control multilazo y red fieldbus

Figura 9.124 Control integrado de la planta. Fuente: Experion de Honeywell

La ampliación del control distribuido, añadiendo más lazos de control, lleva consigo un coste adicional en espacio en la sala de control e ingeniería, por lo cual, la tendencia es usar la arquitectura *Fieldbus Foundation* (u otro sistema de comunicaciones, *WorldFip* o *Profibus*, etc.) que permita el acceso a un control, independientemente del lugar de la planta. Por ejemplo, una función de control *PID* puede estar en cualquier punto del sistema de control (transmisor, la válvula o en otro instrumento). Este reparto de funcionalidad, en los instrumentos de campo, puede liberar el sistema de control y admitir funciones más elevadas, tal como el control avanzado.

En una nueva planta pueden unirse cuatro niveles, el primer nivel de campo con una red *Foundation Fieldbus*, el segundo en la sala de control con ordenadores comunicados por una red *Ethernet*, el tercero de aplicaciones al proceso y su complementario, el nivel 3.5 con seguridad, antivirus y PHD y el cuarto para gerencia. Todo ello, complementado por un circuito sin hilos para gerencia y para el control de procesos.

9.14.3 Gestión de alarmas

Una alarma expresa una situación anormal que puede causar importantes incidentes y pérdidas de producción, y en casos extremos de vidas. A veces, la gestión de las alarmas no ha sido bien estudiada desde el punto de vista de ayuda al operador de la planta, por lo que suele haber demasiados puntos de alarma. De este modo, el operador ve normalmente a las alarmas como una molestia en lugar de una ayuda.

A señalar que, un incidente en el proceso, representa por año una pérdida del 3% al 8% en la capacidad de producción de la planta y que, por cada incidente, el 5% al 12% es causado por problemas de gestión inadecuada de las alarmas, es decir, un total del 0,15% al 1% de la producción. Por ello, es de interés realizar una buena gestión de las alarmas, teniendo en cuenta además que la gestión correcta ayuda al operador a realizar un mejor trabajo en la operación de la planta.

Es necesario establecer una filosofía de las alarmas considerando la opinión del staff de la planta para que el análisis y la racionalización de las mismas, sea eficiente y efectivo. De acuerdo con las recomendaciones de EEMUA (*Engineering Equipment Manufacturers and Users Association*) debe prestarse atención a los siguientes puntos:

1. Enfocar la atención del operador a las alarmas más importantes.
2. Los mensajes deben ser claros y comprensibles.
3. Proporcionar la información sobre la acción correctora recomendada y registrar los comentarios sobre las acciones tomadas o sobre las requeridas en el futuro.
4. Bloquear todas las alarmas de un instrumento de campo o de un área del proceso (por ejemplo, si el instrumento se está revisando o una parte de la planta está parada).
5. Analizar las alarmas para identificar las ruidosas y molestas o las áreas que requieren de un entrenamiento adicional de los operadores.

Las alarmas mal gestionadas tienen en común:

- Alarmas molestas cuando se producen de forma regular o intermitente.
- Demasiadas alarmas en situaciones anormales.
- Alarmas en cascada.
- Mensajes de alarma confusos e inútiles.

- Un número demasiado alto de alarmas de alta prioridad.
- Demasiadas alarmas permanentes en el sistema que hacen que el operador las ignore.

En la tabla 9.10 pueden verse las recomendaciones de EEMUA según el tipo de industria.

Alarmas	EEMUA	Petróleo y Gas	Petroquímica	Potencia eléctrica	Otros
Nº promedio de alarmas/día	144	1.200	1.500	2.000	900
Nº de alarmas permanentes	9	50	100	65	35
Máximo de alarmas en 10 minutos	10	220	180	350	180
Nº medio de alarmas en 10 minutos	1	6	9	8	5
% de distribución (bajo/medio/alto)	80/15/5	25/40/35	25/40/35	25/40/35	25/40/35

Tabla 9.10 *Recomendaciones sobre alarmas de EEMUA según el tipo de industria*

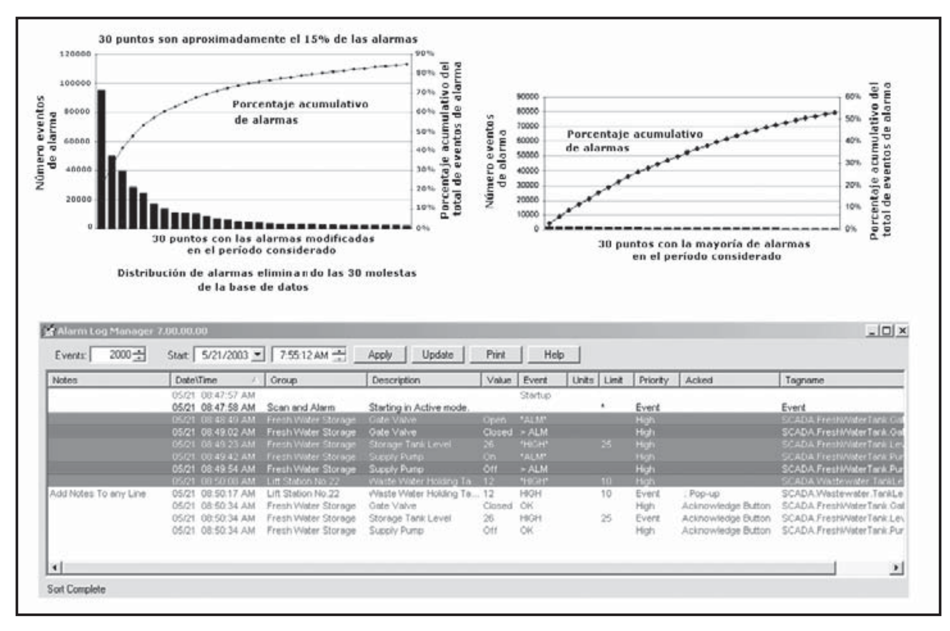


Figura 9.125 *Distribución de alarmas y visualización en pantalla.*
Fuente: Honeywell y Alarm Log Manager (Specter)

Es deseable que la alarma sea notificada al personal de mantenimiento para que éste pueda reaccionar, ayudando si es necesario al operador de la planta.

9.14.4 Sistema de gestión de laboratorio

Los sistemas de gestión del laboratorio están especialmente diseñados para entornos de Química Analítica, permitiendo básicamente:

- Almacenar información sobre las muestras, así como los ensayos realizados sobre ellas y sus resultados.

- Recuperar los datos almacenados, tanto puntuales como históricos.
- Seguir el progreso de las muestras.

La "*Plantilla Analítica*" es el corazón del sistema y recoge la modelización de los datos sobre las muestras que regularmente se analizan en el laboratorio, los ensayos realizados sobre ellas y los resultados que se prevén antes de que estas muestras lleguen al laboratorio.

La entrada de resultados puede ser manual (formularios o pantallas) o automática. Es posible obtener información acerca de los envíos, de las muestras y de los resultados (progreso del análisis, seguimiento de clientes y localización de las muestras).

Las operaciones pueden APROBARSE o NO APROBARSE, manual o automáticamente, y es posible realizar informes.

Los equipos del laboratorio pueden calibrarse a través del sistema de calidad ISO 9000:2000 y generarse las calibraciones correspondientes de los equipos analíticos del laboratorio.

Finalmente, la información puede extraerse para enviarla a los sistemas de control y de gestión que requieren información analítica para poder realizar balances, control de procesos, seguimiento de la producción, etc., y conocer el modo de operación de las unidades, dato que refleja el estado de funcionamiento de éstas (marcha, parada, recirculación, tipo de carga, etc.).

9.14.5 Sistema de gestión de la producción

Partiendo de que la planta dispone de un sistema de control adecuado (control distribuido, etc.) que facilite la información suficiente, sigue en tiempo real las variables de proceso, las monitoriza, y las analiza de forma sencilla para mostrarlas gráficamente con su tendencia. Los operadores, técnicos y responsables de las plantas tienen acceso a la información correspondiente a través de un gran ordenador, o bien utilizando sus ordenadores personales. Es posible manejar estos datos (y los eventos correspondientes) elaborando y presentando información al usuario mediante el desarrollo de programas, principalmente de cálculo.

El sistema está conectado con el programa de gestión del laboratorio, de modo que recibe información sobre el modo de operación de las distintas unidades y, en algunos casos, datos sobre la toma de muestras del proceso (hora, resultados analíticos, etc.).

Por otra parte, el control distribuido permite la gestión de los elementos de almacenamiento de la planta, como son tanques, esferas y silos, calculando, para cada periodo de tiempo (puede ser una hora), las existencias de materias primas y de productos fabricados y cerrando los balances diarios a horas determinadas que, en una planta de proceso continuo, suele ser las cero horas de cada día. También se gestionan los productos de entrada y de salida a través de los diferentes medios de transporte utilizados: barcos, oleoductos, ferrocarril y cisternas. Y se gestiona el balance diario (existencias iniciales y finales, entradas y salidas, producción y consumos) y el balance mensual.

De este modo, se dispone de un control físico de la producción prácticamente automatizado, facilitando a los técnicos y gestores el análisis del comportamiento de la plantas y la toma de decisiones correspondiente.

9.14.6 Red de comunicaciones

La *red de comunicaciones* tiene como objetivo permitir el intercambio de información (diálogo o conversación) entre dos o más elementos (PCs, servidores, impresoras, *mainframes*, etc.) llamados

nodos de la planta. Estos nodos deben estar unidos físicamente (cableado, conectores, electrónica, etc.) y usar las mismas normas básicas de diálogo (protocolos) o, en su defecto, disponer de los equipos traductores necesarios para la conversión de normas. Los fabricantes de sistemas de comunicaciones empezaron con sus propios sistemas llamados propietarios, es decir, sistemas en los que no es posible intercambiar sus aparatos con los de otros fabricantes.

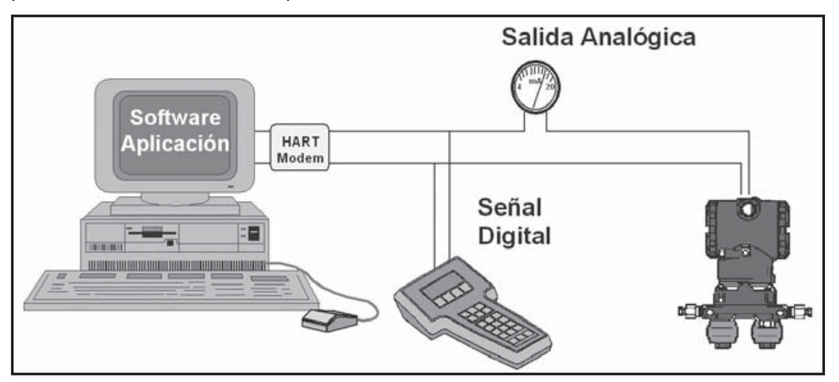


Figura 9.126 Comunicación punto a punto

Sin embargo, debido a la lógica demanda del mercado, fabrican sistemas abiertos con protocolos estándar utilizados ampliamente por diferentes empresas que fabrican productos, de modo que son compatibles entre sí. Es natural que un fabricante se resista a divulgar su sistema debido al alto coste que ha pagado por la investigación y el desarrollo de su producto, pero al final, se impone el deseo del cliente.

Las *comunicaciones punto a punto* (figura 9.126) lo hacen con el instrumento de manera individual, usualmente mediante un comunicador portátil y permiten la configuración del equipo y la lectura de diagnósticos. Para ello, hay que desplazarse a planta y conectarse con el instrumento. Esto se hace típicamente cuando el instrumento no funciona bien y se quiere ver lo que ocurre (mantenimiento correctivo).

Las *comunicaciones multipunto* permiten acceder simultáneamente a más de un instrumento. Hay varios tipos:

- *Topología de bus*: el protocolo digital hibrido (*HART*) permite conectar varios instrumentos a través de un par de hilos a modo de bus. La conexión se hace digitalmente utilizando una alimentación constante de 4 mA. Limitado a aplicaciones con poca velocidad de transmisión (tanques).
- *Comunicación "on-line"* (figura 9.127): instrumentos con protocolos híbridos y sistemas de control utilizando la señal 4-20 mA partiéndola en dos salidas, mediante multiplexores: una de 4-20 mA para el sistema de control y otra, con la señal digital, al sistema de gestión de instrumentación, mediante comunicación serie RS-485. Así pueden gestionarse históricos, alarmas, calibraciones, etc.
- *Comunicación mediante instrumentación inteligente*: recibiendo la información del microprocesador del instrumento y realizando diversas funciones, tales como configuración de equipos (datos, auto-test, pruebas del lazo, etc.), diagnósticos (estado del instrumento, útil para el mantenimiento correctivo e incluso preventivo si avisa antes del fallo), monitorización de alarmas, gestión de calibraciones del instrumento (definición, ejecución y grabación del test).

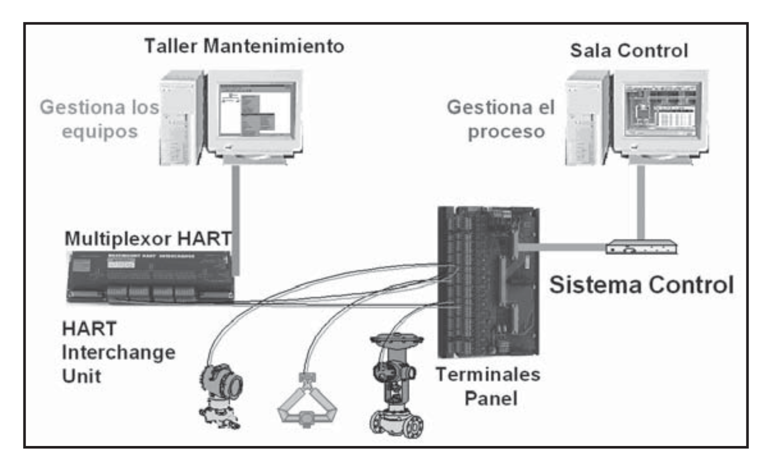


Figura 9.127 Comunicación on-line

Por razones técnicas, prestaciones y costes, principalmente, una red de datos formada de forma integrada con varias plantas alejadas entre si, se subdivide en subredes llamadas LAN (*Local Area Network*) caracterizadas por abarcar unos pocos km y poseer una alta velocidad Mbits/s) para el intercambio de información. Cumplen una serie de normas, independientes de los protocolos que internamente hablan los nodos, que definen principalmente las características físicas del cable (cobre y fibra óptica) y los conectores.

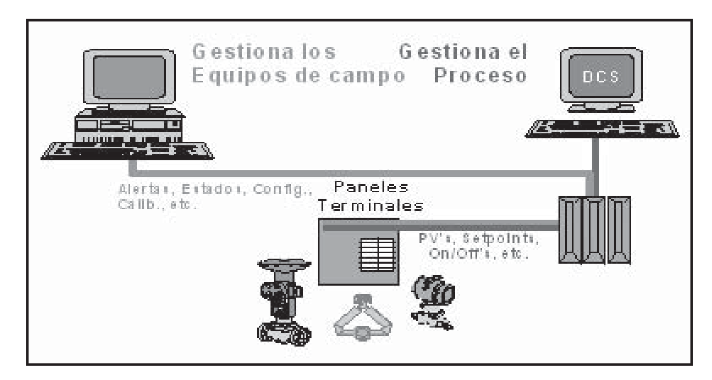


Figura 9.128 Comunicaciones por fieldbus

El *sistema de comunicaciones Foundation Fieldbus* (figura 9.128) que apareció hacia 1980, y comentado en el capítulo 2 de transmisores, se caracteriza por:

- Bidireccional, *multi-drop*, es decir varios instrumentos de campo colgados de la misma red al nivel de aparato (H1).
- Interoperatividad.
- Diagnóstico de averías: reduce un 75% el coste del mantenimiento convencional, ya que el personal de mantenimiento trabaja solo en el equipo que hay que reparar e incluso puede hacerlo a distancia desde la sala de control.
- Mejora de la integridad del control al ser posible el control *PID* en campo.
- Menor susceptibilidad al ruido eléctrico que la clásica señal de 4-20 mA c.c.

- Límites más estrechos de oscilación alrededor del punto de consigna.
- El *fieldbus* interconecta transmisores, posicionadores, multiplexores I/O y otros equipos y está diseñado para control básico y avanzado.
- El circuito utilizado se usa a nivel de ordenador principal como sistema de alta velocidad entre enlaces, estaciones de trabajo, servidores, etc., y su objeto es la integración de subsistemas y aplicaciones de control de alto rendimiento

Ethernet complementa la tecnología *fieldbus* (estándar IEC 61158) y las dos tecnologías proporcionan una solución abierta a la integración de los aparatos de campo y de panel, permitiendo las comunicaciones al nivel de gerencia, que así dispone de la información suficiente para, entre otras posibles actuaciones, reducir la fabricación si la demanda de productos es escasa y optimizar la fabricación con relación a la vida de los equipos.

Sin embargo, casi todos los protocolos con base *Ethernet* son propietarios y, si bien los aparatos de *Ethernet* pueden interconectarse, usualmente no es posible su interoperatividad. Esto es debido a que el estándar sólo especifica el cable, la dirección del puerto del hardware y del aparato y no incluye el de la aplicación ni las capas del usuario abiertas necesarias para conseguir una completa interoperatividad en el circuito.

La *transmisión sin hilos* (*wireless*) es un sistema de comunicaciones que permite situar, en el proceso el transmisor y el receptor en las mejores condiciones. Trabaja con las normas IEEE 802.3, IEEE 802.11 a/b/g, IEEE 802.11q, ISA100, ANSI/ISA-TR99.00.01-2007 (*Tecnologías de seguridad para los sistemas industriales de automatización y de control*) y 802.11 Wi-Fi.

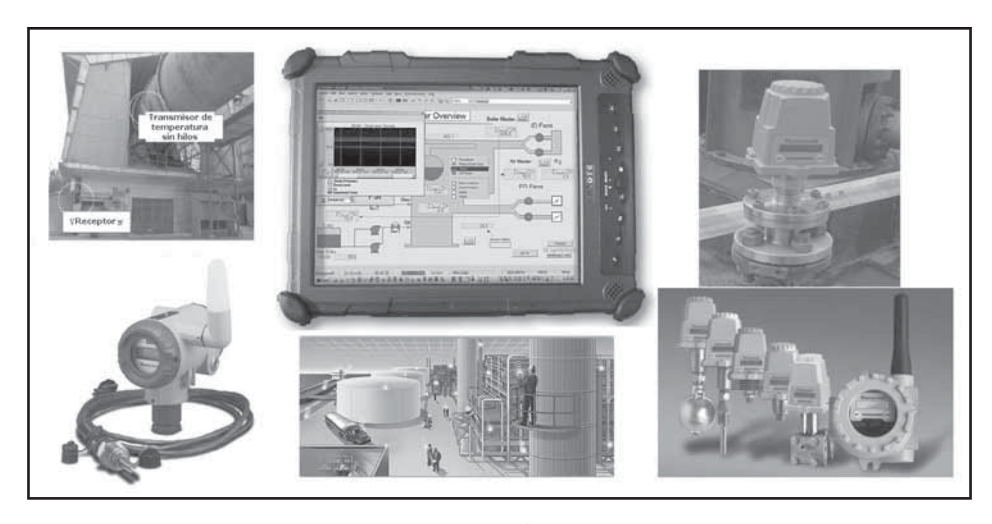


Figura 9.129 Transmisión sin hilos (wireless)

Es un sistema que se amortiza económicamente teniendo en cuenta el ahorro en el cable, en particular en distancias considerables, entre el transmisor y el receptor. Por ejemplo, una instalación de cableado de 600 m con un coste de 100 euros/m importa 60.000 euros. Otras ventajas, son disponer de transmisores de variables en lugares remotos o peligrosos sin necesidad de cableado, utilizar una tecnología de encriptación, una transmisión segura sin interferencias FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) y la alimentación con pilas de litio de 3,6 V con una vida útil de 5 años. Los transmisores proporcionan una exactitud del ± 0,1% y la distancia de transmisión sin obstáculos es de unos 600 m.

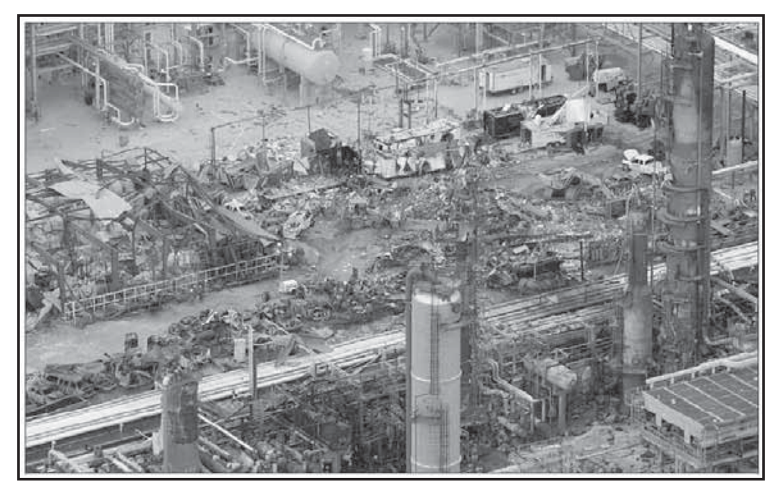
9.14.7 Sistema de gestión de seguridad de la planta

La gestión correcta de la seguridad, estudiada en este mismo capítulo, presenta las siguientes ventajas al usuario (normas ISA 8401 e IEC 61508):

- Disponibilidad óptima de la planta.
- Aumento de la productividad.
- Mejor mantenimiento.
- Mejor seguridad del proceso.
- Aumento de la vida útil de la planta.

Lógicamente, los fabricantes que ofrecen equipos certificados en seguridad por IEC 61508 pueden asesorar al usuario, en particular, en equipos tales como calderas de vapor, compresores y turbinas, tuberías, sistemas de vigilancia, detección de fuego y fuga de gases, etc.

Entre los organismos que certifican los sistemas de seguridad se encuentran FMRC (*Factory Mutual Research*) y la TÜV alemana.



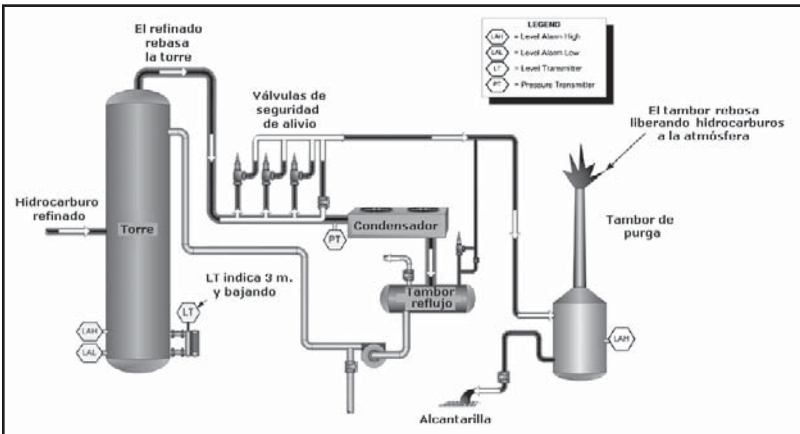


Figura 9.130 Explosión e incendio en una refinería. Fuente: Informe 2005-04-I-TX marzo 2007 BP

En la figura 9.130 pueden verse la imagen de los resultados de una explosión en una refinería. El accidente se produjo en el arranque de una unidad ISOM, cuando el personal de operaciones bombeó hidrocarburo inflamable a una torre que estaba llena de líquido, debido a que un operario había cerrado la válvula que comunicaba la torre con el tanque de almacenamiento. Los instrumentos de control y las alarmas, al dar falsas indicaciones, no alertaron a los operadores sobre el alto nivel de líquido en la torre. El líquido rebosó e inundó la tubería de cabeza de la parte superior de la torre (52 m de altura), con lo que las 3 válvulas de alivio, situadas a 45 m debajo, dispararon durante 6 minutos inundando, con líquido inflamable, un tambor de purga que rebosó y emitió el líquido en exceso en forma de geiser de 34 m de altura, que al caer al suelo formó una nube de vapor inflamable. Un coche con motor diesel en marcha a 7 m del depósito fue la fuente de ignición y hubo una explosión que mató a los 15 operarios que estaban en la zona, causó heridas a otros 180 y destruyó el equipo.

En el informe se muestran, como causa del accidente, errores humanos por mal entrenamiento y fatiga, mal mantenimiento del material y el vehículo con el motor en marcha a poca distancia.

El informe está emitido por la CSB (*U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board*), que es un agencia independiente que investiga los accidentes químicos con el fin de proteger a los operarios y al medio ambiente, y que emite recomendaciones de seguridad a las industrias. Dispone de documentación de accidentes, en varios idiomas, con fotos y videos.

9.14.8 Sistema de gestión de la calidad (ISO 9000:2000)

El organismo ISO, cuyas siglas significan *International Standards Organization* (Organización Internacional de Normas), tiene la finalidad de crear una normativa común basada en las normas utilizadas en muchos países y que cubren una gran variedad de temas. La norma ISO 9000 del año 1994 fue actualizada en el año 2.000 bajo el nombre de ISO 9000-2000.

La norma editada el año 1994 constaba de las partes:

- ISO 9000 - *Generalidades*.
- ISO 9001 - *Proyecto, fabricación, instalación y servicios*.
- ISO 9002 - *Producción e instalación*.
- ISO 9003 - *Inspección y ensayo final del producto*.
- ISO 9004 - *Sistemas de dirección de la calidad*.

Se orientaba al aseguramiento de la calidad (acciones sistemáticas y predeterminadas) insistiendo en la necesidad de procedimientos documentales para garantizar el cumplimiento de los requisitos.

En la nueva norma ISI 9000:2000 desaparece la idea de predeterminado y sistemático, cambiando la exigencia de procedimientos documentados por la de procesos adecuados (con o sin procedimiento documental), siendo uno de sus objetivos principales el aumento de la satisfacción del cliente. El número de estándares queda reducido a:

- ISO 9000 - *Fundamentos de la gestión de la calidad y terminología*.
- ISO 9001 - *Requisitos del proyecto, fabricación, instalación y servicios de productos*. Última versión publicada ISO 9001:2008 que mejora su aplicación por parte de las empresas públicas y su compatibilidad con la de gestión ambiental ISO 14001.
- ISO 9004 - *Sistemas de dirección y organización de la calidad*.
- ISO 19011 - *Auditorías de gestión de calidad y gestión ambiental*.

Los requisitos del cliente son productos con características que satisfacen sus necesidades y expectativas y que se expresan en la especificación del producto. La realización del producto y las mediciones para garantizar su calidad corresponden a la empresa atendiendo a las variables críticas del proceso de fabricación. Este comportamiento de la empresa, conduce a una satisfacción del cliente y ello repercute en un análisis, y mejora del proceso de producción en la forma vista en la figura 9.131 del modelo de gestión de calidad.

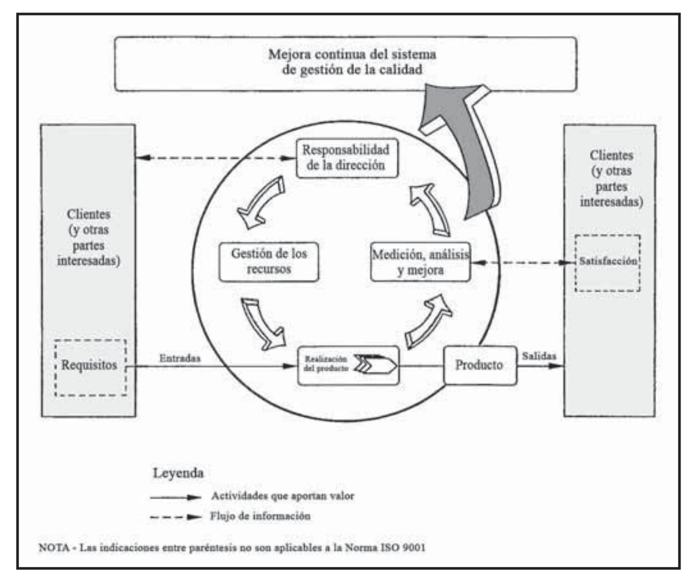


Figura 9.131 Lazo de control ISO 9000

La norma ISO 9001 establece los requisitos que debe cumplir un sistema de calidad cuando, contractualmente, debe ponerse de manifiesto la capacidad de un suministrador para proyectar y suministrar un producto o servicio. Estos requisitos tienen como objetivo fundamental evitar productos no conformes en todas las etapas, desde el proyecto del producto hasta el final de su vida útil o, si estos se producen, detectarlos antes de su instalación y tomar las medidas correctivas oportunas. Estas medidas pueden contener una inspección final y los ensayos correspondientes.

Con relación al apartado de "*Equipos de inspección, medida y ensayo*", el sistema de calidad ISO 9001 establece que el suministrador de un producto debe aportar una confirmación metrológica (conjunto de operaciones necesarias para asegurar que el equipo de medición cumple con los requisitos para su uso previsto).

Es decir:

- Identificar, calibrar y ajustar todo el equipo de inspección, medida y ensayo que puede afectar la calidad del producto, a intervalos definidos con relación a equipos de calibración certificados por un organismo reconocido.
- Establecer, documentar y mantener los procedimientos de calibración de los instrumentos y de los equipos de calibración.
- Asegurar que las condiciones ambientales son adecuadas para las operaciones de calibración, inspección, medida y ensayos que se efectúen en los instrumentos.

La empresa debe establecer una función metrológica, es decir una función con responsabilidad en la organización, para definir e implementar el sistema de control de las mediciones. La implantación de la norma ISO 9000 presupone la redacción de manuales de calibración de los instrumentos afectados (clave en la obtención de la calidad esperada del producto fabricado por la empresa), la creación de procedimientos documentados para la calibración y la conformidad o no-conformidad de los instrumentos y equipos de calibración, el entrenamiento del personal destinado a la calibración ISO 9001 y la creación de un área separada, dentro del taller de instrumentos, donde se encontrarán ubicados los equipos y herramientas de calibración.

El período de calibración de cada instrumento es fijado por la propia empresa, de acuerdo con la experiencia que posea sobre el trabajo en la planta. Normalmente, suele ser de un año para los aparatos normales.

Por supuesto, la empresa objeto de la certificación deberá disponer de una determinada documentación, que incluirá como mínimo el Manual de Aseguramiento de la Calidad, para que sean revisados con antelación a la auditoria por parte de la entidad certificadora. En una concesión de certificación por parte de un organismo de certificación, como AENOR por ejemplo, hay un compromiso, por parte de la empresa adjudicataria, de mantener el sistema de acuerdo con los principios y procedimientos establecidos en los distintos manuales, y otro compromiso, por parte del organismo de certificación, de independencia, objetividad y comprobación de desviaciones, cada vez que se produzcan o que pueda sospecharse tal desviación y que no haya sido informada preceptivamente.

9.14.9 Estándar OPC de intercambio de datos de proceso

La base de desarrollo de OPC se inicia en 1990 cuando salió al mercado *Windows 3.0* ideado para ejecutar muchas aplicaciones de forma simultánea y que proporcionaba una herramienta para intercambiar datos en tiempo real. Y éste es el propósito de OPC, la comunicación en tiempo real de bases de datos heterogéneos en el panel de control (figura 9.132). Los documentos publicados por OPC, abarcan el acceso de datos, las alarmas, los datos históricos, las recetas en procesos discontinuos (*batch*), la seguridad, el uso de Internet y el intercambio de datos, todo ello a través de servidores.

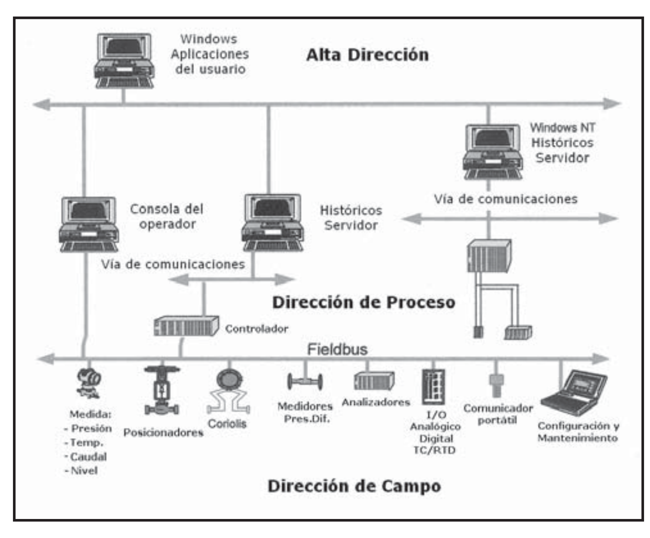


Figura 9.132 Arquitectura del control de procesos

OPC significa OLE (*Object Linking and Embeding* - enlace e incrustación de objetos) para Control de Procesos (*Process Control*) y está basado en la tecnología COM (*Component Object Model*) de Microsoft. En agosto de 1996, se crea la fundación OPC para gestionar el estándar OPC, que es un estándar abierto para compartir datos entre dispositivos de campo y aplicaciones de ordenador. Tiene actualmente más de 425 compañías que son miembros, entre los cuales se encuentran las empresas líderes en instrumentación y control de procesos, tales como ABB, Digital, Fisher-Rosemount, Foxboro, Honeywell, Intellution, Johnson Yokogawa, National Instruments, Siemens, ExperTune, etc.

OPC es un conjunto de interfases COM que se caracterizan por ser invariables, por tratar objetos distintos de la misma forma (polimorfismo), por ser implementadas por servidores OPC y por conectar objetos, de tal modo que los objetos y sus clientes pueden establecer una comunicación bidireccional.

El OPC *Data Access* (V 2.05 Enero 2002) proporciona acceso a datos en tiempo real entre una aplicación formada por servidores y clientes OPC y un dispositivo de control de procesos. Cada cliente, es decir cada aplicación de usuario, SCADA, módulo histórico, o aplicación de usuario en C++, interroga al servidor que contiene los datos que necesita. Los servidores, proporcionan las interfases y están organizados en GRUPOS, y cada grupo puede contener distintos ITEMS. Los ítems representan conexiones a fuentes de datos dentro del servidor (variables de proceso). A cada ítem se asocia un valor (valor de la variable de proceso), un calificador (estado de la variable, OK, bajo rango, etc.) y una marca de tiempo (figuras 9.133 y 9.134)

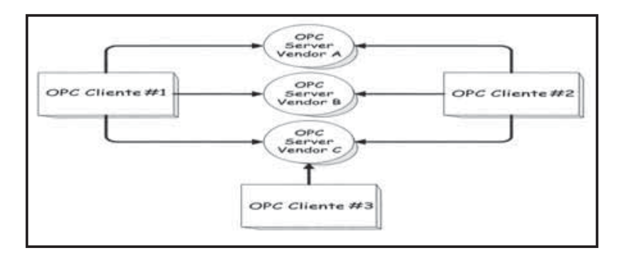


Figura 9.133 Relación cliente servidor

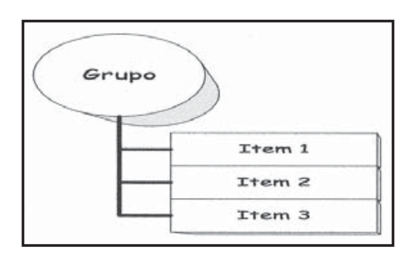


Figura 9.134 Grupos de datos

La seguridad de los datos está contemplada en OPC estableciendo las entidades principales (usuarios, ordenadores, etc.), los objetos de seguridad (ficheros, directorios, etc.), el monitor de referencia que facilita los accesos autorizados y el canal de comunicaciones que comunica dos entidades activas dentro del sistema.

OPC satisface la necesidad de integración en la industria y establece que los fabricantes sólo fabriquen un conjunto de componentes software que van a ser usados por los clientes en sus aplicaciones, que los programadores sólo deban conocer un programa de aplicación de interfase (API = *Application Programming Interface*) con independencia de los elementos de campo a integrar y que los clientes

puedan elegir el hardware y/o el software de manera independiente. De este modo, OPC proporciona un enlace entre la planta y gerencia y, mediante la tecnología internet y los buscadores de información, ofrece al usuario la información necesaria para dirigir el proceso, la planta y su negocio. La información disponible para la dirección permite cumplir con las normas o reglamentos según el tipo de industria.

En la figura 9.135 puede verse un aspecto de la pantalla de visualización de datos de dos aplicaciones OPC.

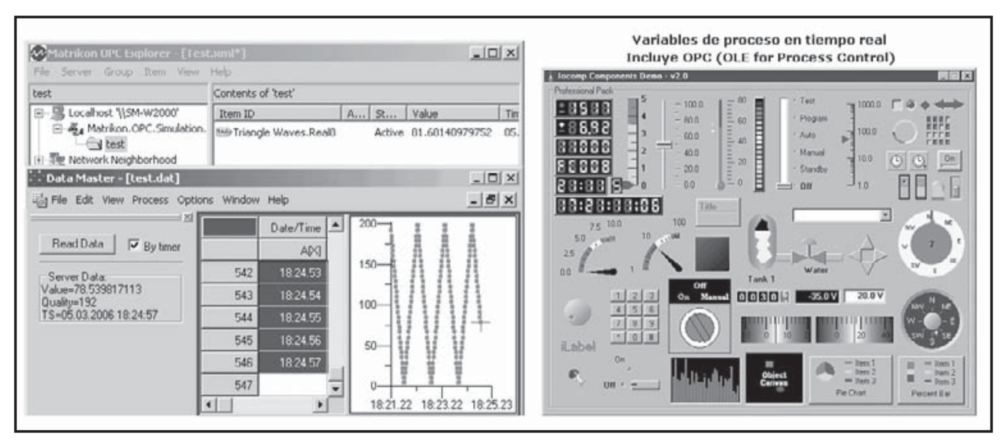


Figura 9.135 Pantalla OPC

9.14.10 Gestión de calibraciones

La confianza, en la bondad y en las indicaciones de los instrumentos de indicación y control, depende de la gestión de calibraciones y es vital para la producción de calidad de una planta.

La gestión de calibraciones de los instrumentos de la planta consta de las partes:

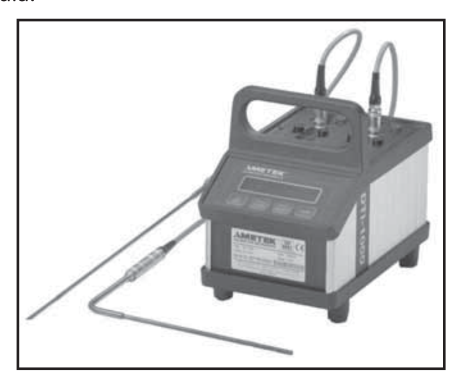
- El test de calibración donde se define la exactitud, la frecuencia de las calibraciones, los puntos del rango a verificar y el establecimiento de los patrones. De este modo, se tiene un histórico de como estaba el equipo y como queda después de calibrarlo.
- La periodicidad de las calibraciones.
- Las rutas de calibración que, en conjunción con calibradores con protocolo digital, permite realizar calibraciones automáticas.

Hoy en día cada vez hay más aparatos de calibración con patrones automáticos que son compatibles con protocolos digitales (HART, Fluke, Beamex, Druck, etc.), y que son utilizados por la mayoría de las empresas que tienen certificados de calidad ISO 9000. Éstas, emplean equipos de calibración automáticos que simplifican enormemente el trabajo de calibración y permiten emitir, automáticamente, curvas de calibración y los certificados correspondientes, así como un histórico de calibraciones con las incidencias encontradas (figura 9.136).

Un ejemplo de calibración lo constituye la válvula de control. Dotada de un posicionador digitoneumático (figura 9.137) dispone de una interfase con protocolos de comunicación HART (*Highway Addressable Remote Transducer*) o *Fieldbus FOUNDATION* (u otros sistemas de comunicaciones) y de un microprocesador, lo que le permite realizar diversas funciones, aparte de la propia del posicionador

que es la de posicionar el obturador de la válvula y convertir la señal digital a señal neumática de salida hacia el servomotor neumático de la válvula.





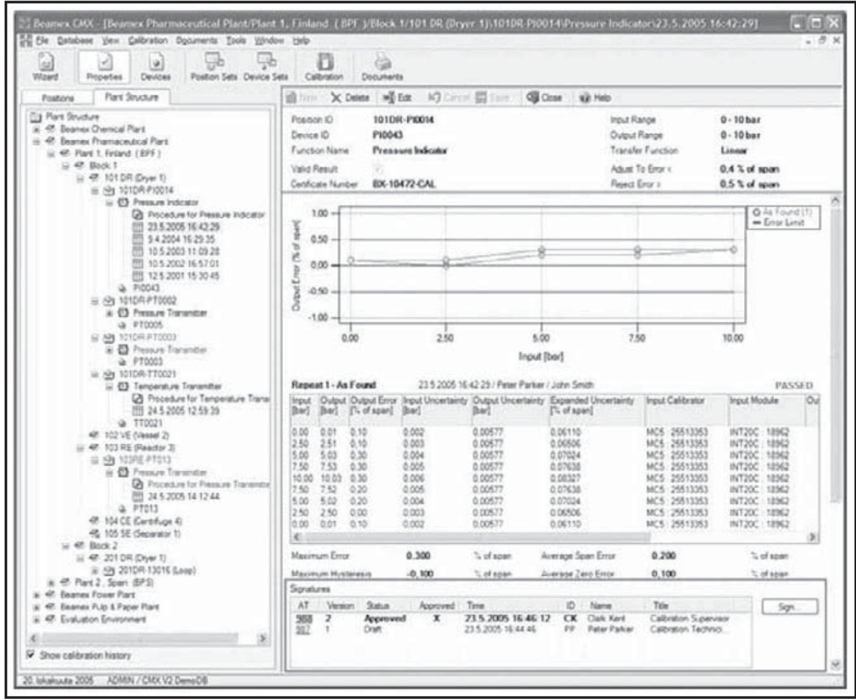


Figura 9.136 *Aparatos de calibración e informe de calibración de un manómetro. Fuente: Beamex y Ametek*

Dispone de las siguientes características:

- Tiempos de respuesta ajustables por el usuario.
- Acción directa o inversa.
- Compatibilidad con actuadores de acción directa o inversa.
- Configuración del cero y el *span* para operación con margen partido.
- Caracterización de la válvula a las curvas lineal, isoporcentual, apertura rápida y personalizada por el usuario.

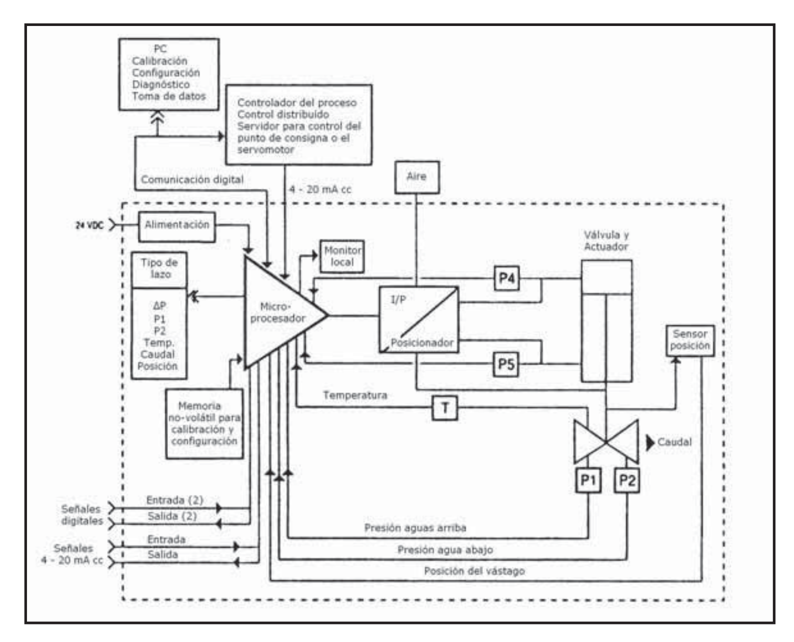


Figura 9.137 Posicionador electroneumático/digital inteligente

- Entradas adicionales (interruptores final de carrera, etc.).
- Operación, calibración y configuración locales y remotos.
- Ajuste automático del recorrido de la válvula.
- Ajuste de la fuerza de asentamiento del obturador de la válvula.
- Calibración del margen de recorrido del vástago.
- Controlador *PID* opcional.

Como el posicionador conoce, por retroalimentación, la posición del vástago de la válvula, una función de diagnóstico incorporada permite conocer el estado del mantenimiento de la válvula, del actuador y del propio posicionador. De este modo, el servicio de mantenimiento puede realizar su trabajo cuando sea realmente necesario, al poder visualizar a distancia datos tales como el recorrido total del vástago desde la puesta en servicio de la válvula, el rozamiento de la estopada, la velocidad instantánea del vástago, el registro del tiempo de funcionamiento de la válvula, los datos históricos de calibración, la configuración de la válvula y la base de datos iniciales del fabricante.

Esta función avanzada de mantenimiento predictivo permite averiguar el estado de la válvula sin desmontarla. La "firma" (figura 9.138), es decir, el registro gráfico del estado del conjunto válvula-actuador (medida de la histéresis, zona muerta y linealidad, gráficos o "firmas" del posicionador, del asentamiento, del actuador, de la presión de alimentación con relación al recorrido del vástago) puede compararse con "firmas previas" grabadas, en la puesta en servicio y en estados posteriores, para descubrir cambios en el funcionamiento de la válvula antes de que causen problemas reales en el control del proceso. También puede realizarse un diagnóstico del proceso y de las comunicaciones y un análisis de fallos. La información puede obtenerse directamente en la válvula o a través de un ordenador personal o de una consola de operador en la sala de control.

Con relación a la calibración del resto de instrumentos, de la planta, el software analiza los datos e interpreta los síntomas y fallos, generando una acción recomendada de mantenimiento. De este modo, el técnico de mantenimiento le basta pulsar unas pocas teclas para comprobar a distancia un instrumento, configurarlo y calibrarlo. Y el *staff* de mantenimiento puede vigilar el estado de los instrumentos a través del monitor, con lo que sabe inmediatamente si existe un problema, lo que, evidentemente, ahorra paros de la planta inesperados.

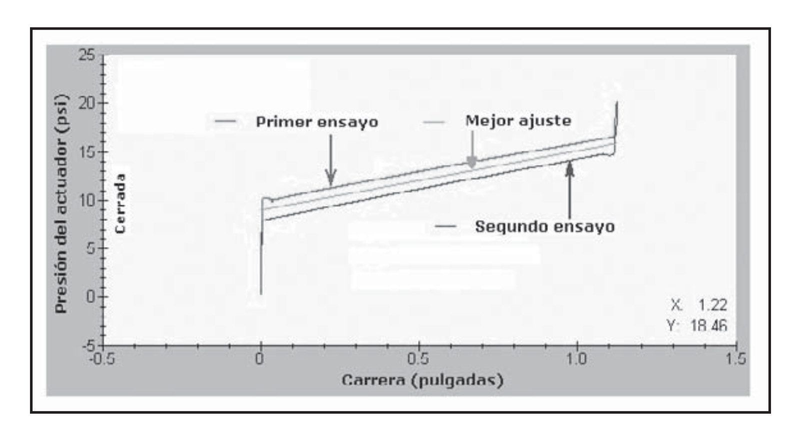


Figura 9.138 Gráfico de firma de la válvula

Se crea además, una base de datos de todos los instrumentos comunicados con el sistema y la gestión de su mantenimiento. En el mercado se encuentran entre otros programas de gestión: AMS de Fisher Rosemount, ASSET MAX de Honeywell, PDM de Siemens, SMARTVISION de ABB y PC20 de Foxboro.



Capítulo 10
Calibración de los instrumentos

10.1 Generalidades

Los instrumentos industriales pueden medir, transmitir y controlar las variables que intervienen en un proceso. En la realización de estas funciones existe una relación entre la variable de entrada y la de salida del instrumento. Por ejemplo, la presión del proceso a lectura de presión de la escala en un manómetro, la temperatura real a señal de salida electrónica en un transmisor electrónico de temperatura, la señal digital de entrada a señal digital de salida en un controlador digital, la señal de entrada neumática a posición del vástago del obturador en una válvula de control, etc.

Esta relación puede encontrarse, también, en las partes internas de un instrumento, en particular, cuando éste es complejo, por ejemplo, en el caso de un controlador electrónico miniatura para montaje en panel que está compuesto por varios bloques: unidad de punto de consigna, unidad de control, etc. En la unidad de punto de consigna existirá una relación entre la posición del botón de mando y la señal estándar que va al bloque controlador. En la unidad de control estarán ligadas la señal de error (diferencia entre el punto de consigna y la variable) y la señal de salida a la válvula de control, relación que será función de las acciones que posea el controlador.

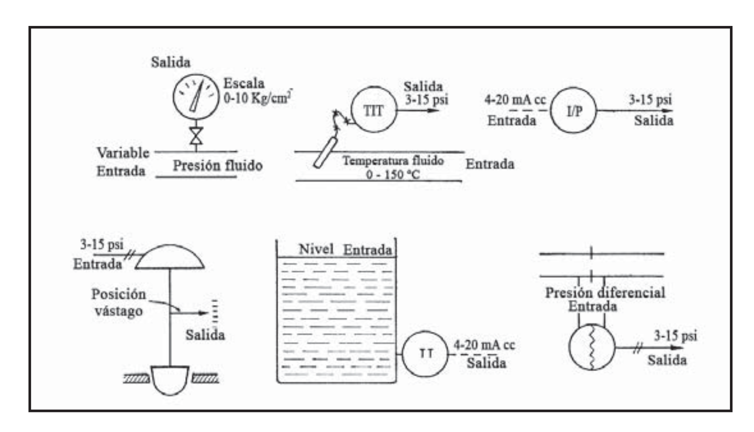


Figura 10.1 *Relación salida-entrada en varios tipos de instrumentos*

Existirá una correspondencia entre la variable de entrada y la de salida (figura 10.1), representando esta última el valor de la variable de entrada. Siempre que el valor representado corresponda exactamente al de la variable de entrada, el instrumento está efectuando una medición correcta. Ahora bien, en la práctica, los instrumentos de medición y control indican unos valores inexactos que se apartan, en mayor o menor grado, del valor real de la señal de entrada. El valor verdadero no se puede establecer, sólo sus límites que entran dentro de la exactitud del instrumento. De este modo, un instrumento estará descalibrado si al compararlo, con otro instrumento patrón, la lectura se aparta del valor de la exactitud dado por el fabricante.

10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración

En un instrumento ideal (sin error), la relación entre los valores reales de la variable comprendidos dentro del campo de medida y los valores de lectura del aparato es lineal.

Se considera que un instrumento está bien calibrado cuando, en todos los puntos de su campo de medida, la diferencia entre el valor real de la variable y el valor indicado, o registrado o transmitido, está comprendido entre los límites determinados por la exactitud del instrumento.

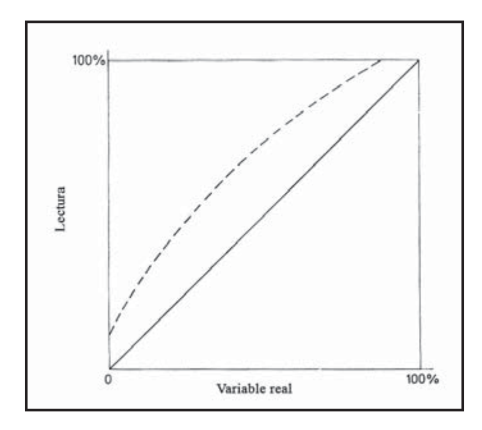


Figura 10.2 Curva variable real-lectura

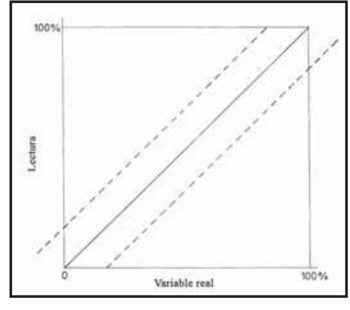
En condiciones de funcionamiento estático, las desviaciones de la curva variable real-lectura de un instrumento típico (figura 10.2) con relación a la recta ideal representan los errores de medida del aparato. Esta curva puede descomponerse en tres que representan individualmente los tres tipos de errores que pueden hallarse en forma aislada o combinada en los instrumentos.

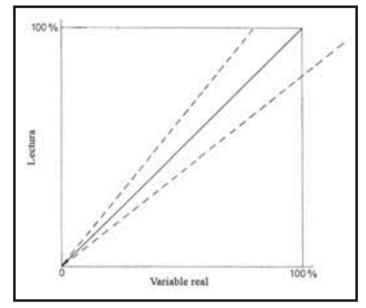
- *Error de cero.* Todas las lecturas o señales de salida están desplazadas un mismo valor con relación a la recta ideal. Este tipo de error puede verse en la figura 10.3a, donde se observa que el desplazamiento puede ser positivo o negativo. Cambia el punto de partida o de base de la recta representativa sin que varíe la inclinación o la forma de la curva.
- *Error de multiplicación.* Todas las lecturas o señales de salida aumentan o disminuyen progresivamente con relación a la recta representativa (figura 10.3b), sin que el punto de partida cambie. La desviación puede ser positiva o negativa.
- *Error de angularidad.* La curva coincide con los puntos 0% y 100% de la recta representativa, pero se aparta de la misma en los restantes. En la figura 10.3c puede verse un error de este tipo. El máximo de la desviación suele estar a la mitad de la escala.

Los instrumentos pueden ajustarse para corregir estos errores, si bien hay que señalar que muchos instrumentos, por su tipo de construcción, no pueden tener el error de angularidad. La combinación de estos tres tipos de errores da lugar a una curva de relación medida real-lectura, como la representada en la figura 10.2.

En general, el *error de cero* se corrige con el llamado *tornillo de cero* que modifica directamente la posición final del índice, la pluma o la señal de salida del instrumento. En algunos instrumentos, por ejemplo un manómetro, es posible extraer el índice y fijarlo al eje de lectura en otra posición.

El *error de multiplicación* se corrige actuando sobre el *tornillo de multiplicación* (o *span* en inglés), que modifica directamente la relación de amplitud de movimientos de la señal de salida (índice o pluma), es decir que aumenta o disminuye, progresivamente, las lecturas sobre la escala.





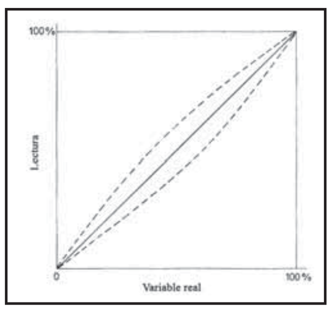


Figura 10.3 Errores de cero, multiplicación y angularidad

El *error de angularidad* se presenta prácticamente sólo cuando el instrumento tiene una transmisión por palancas del movimiento del elemento primario, o de la variable medida, al índice de lectura o de registro. En los instrumentos electrónicos o digitales no existe y, si se presenta, ello indica que el instrumento es defectuoso y hay que sustituirlo. El error de angularidad es nulo cuando las palancas quedan exactamente a escuadra con la variable al 50% de su valor. Se corrige, bien procediendo al escuadrado previo de las palancas o bien aumentando el error (unas cinco veces aproximadamente) en la misma dirección, para alisar la curva de angularidad correspondiente.

Sentadas estas bases, el procedimiento general para calibrar un instrumento (figura 10.4) es el siguiente:

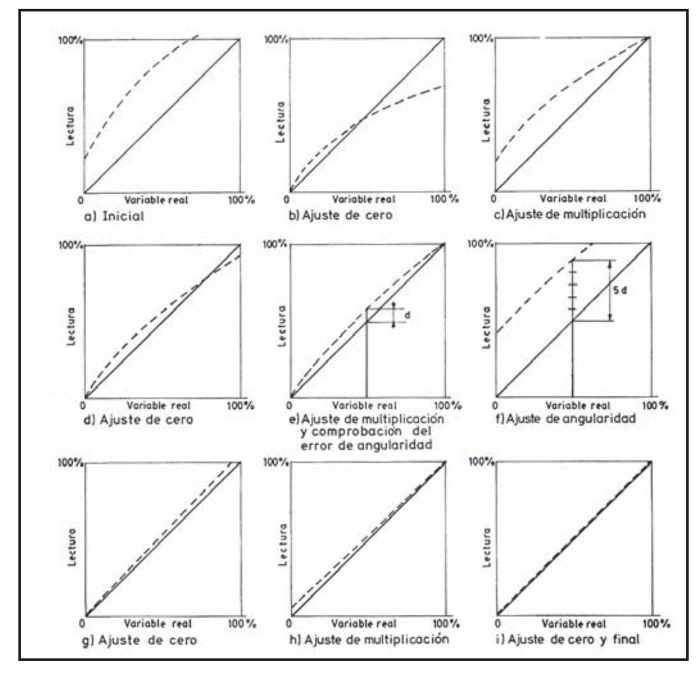


Figura 10.4 Método general de calibración

1. Situar la variable en el valor mínimo del campo de medida y, en este valor, ajustar el tornillo de cero del instrumento hasta que el índice señale el punto de base.
2. Colocar la variable en el valor máximo del campo de medida y, en este valor, ajustar el tornillo de multiplicación hasta que el índice señale el valor máximo de la variable.
3. Repetir los puntos anteriores 1 y 2 sucesivamente hasta que las lecturas sean correctas en sus valores máximo y mínimo (es decir, estén comprendidas dentro de la exactitud del instrumento).
4. Si el instrumento tiene error de angularidad (sólo los mecánicos de transmisión por palancas), ajustar el tornillo de angularidad hasta mover el índice en la dirección del error unas cinco veces (la curva variable-lectura se aplana).
5. Reajustar, nuevamente, los tornillos de cero y de multiplicación hasta conseguir la exactitud deseada o requerida.
6. Comprobar los puntos intermedios 25%, 50%, 75% de la calibración.

También se pueden realizar las comprobaciones al 10% y al 90% de la escala en lugar del 0% al 100%, con el fin de disponer de más holgura en la calibración al principio y al final de la escala, particularmente en los instrumentos indicadores y registradores analógicos.

La posición de los tornillos de cero y multiplicación varía con el tipo de instrumento. Algunos carecen de alguno de ellos. En particular, los termómetros bimetálicos tienen usualmente tornillo de cero, los manómetros poseen tornillo de cero y tornillo de multiplicación y de angularidad. Los instrumentos electrónicos no suelen poseer tornillo de angularidad.

En la calibración de manómetros es necesario extraer la aguja para ajustar el cero, a no ser que el propio manómetro disponga de un engranaje con accionamiento exterior que modifique la posición de la aguja. Es una operación que se debe realizar cuidadosamente, so pena de dañar la aguja y los mecanismos del movimiento, de modo que es necesario emplear extractores.

En los instrumentos digitales inteligentes, los datos de calibración están almacenados en una EPROM y, de este modo, están corregidas con exactitud las no linealidades de los sensores para toda la vida útil del instrumento. Se encuentran grabados unos 126 puntos o más en lugar de los cinco (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) que se consideran cuando se calibra un instrumento convencional. Un comunicador portátil con teclado alfanumérico permite comprobar desde el propio transmisor, o bien desde la consola de control, o bien desde cualquier punto de la línea de conexión (dos hilos), o bien a distancia por infrarrojos, el estado y calibración del transmisor. Estos instrumentos presentan la ventaja de que no es necesaria su calibración.

En todo caso, puede ajustarse el aparato enviando, a través del teclado alfanumérico del comunicador, el número de identificación del instrumento y los valores inferior y superior del campo de medida con los que se desea reajustar el aparato. Es decir, más que considerar la calibración de los instrumentos digitales se puede hablar de explorar el instrumento para configurarlo, planificar su mantenimiento preventivo, investigar las causas de posibles averías o registrar la configuración actual para un uso futuro. Esta información también se puede tratar desde un ordenador de bolsillo o desde un PC.

En la tabla 10.1 se presentan los valores típicos de calibración de los instrumentos convencionales.

Otros errores provienen de la lectura del instrumento por el observador (instrumentos analógicos) (figura 10.5) y son:

Variable %	Señal neumática psi	Señal neumática, bar	mA c.c.	mA c.c.	mA c.c.	mA c.c.	mA c.c.	V c.c.	V c.c.	V c.c.	V c.c.
0	**3**	**0,2**	**4**	1	10	0	0	1	0	0	0
25	**6**	**0,4**	**8**	2	20	1,25	5	2	2,5	12,5	25
50	**9**	**0,6**	**12**	3	30	2,5	10	3	5	25	50
75	**12**	**0,8**	**16**	4	40	3,75	15	4	7,5	37,5	75
100	**15**	**1**	**20**	5	50	5	20	5	10	50	100

Tabla 10.1 Valores generales de calibración de los instrumentos

- *Error de paralaje* que se produce cuando el observador efectúa la lectura de modo que la línea de observación al índice no es perpendicular a la escala del instrumento. Para disminuirlo, algunos instrumentos tienen el sector graduado separado de la escala y a muy poca distancia del índice, y otros poseen un sector especular, con lo que la línea de observación debe ser perpendicular a la escala para que coincidan el índice y su imagen.
- *Error de interpolación* que se presenta cuando el índice no coincide exactamente con la graduación de la escala y el observador redondea sus lecturas por exceso o por defecto.

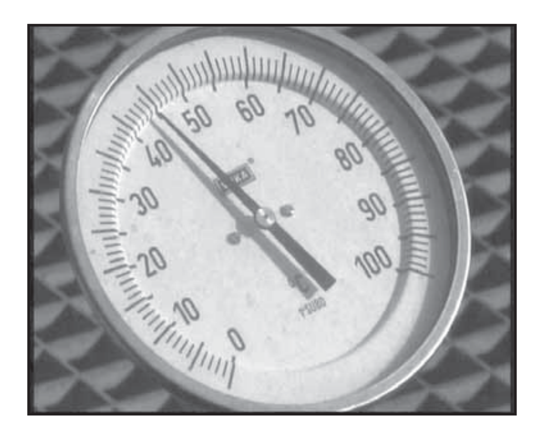


Figura 10.5 Errores de paralaje y de interpolación

Evidentemente, estos errores de paralaje y de interpolación no existen en los instrumentos de salida digital.

La calibración de los instrumentos requiere disponer de aparatos patrones y de dispositivos de comprobación colocados, usualmente, en el taller de instrumentos. Los aparatos patrones deben tener una exactitud 4 veces superior, como mínimo, a la de los instrumentos que van a calibrarse.

10.3 Calibración de instrumentos de presión, caudal y nivel

10.3.1 Presión

Para calibrar los *instrumentos de presión* pueden utilizarse varios dispositivos que emplean, generalmente, manómetros patrón. Estos son manómetros de alta exactitud del orden del ± 0,2% de toda la escala.

Poseen las siguientes características:

- Dial con una superficie especular, efectuándose la lectura por coincidencia del índice y de su imagen.
- Finura del índice y de las graduaciones de la escala.
- Compensación de temperatura con un bimetal.
- Tubo Bourdon de varias espiras.
- Se consigue todavía mayor exactitud (0,1%) situando marcas móviles para cada incremento de lectura del instrumento.

También pueden utilizarse, como aparatos patrón de presión, los transmisores digitales inteligentes por la exactitud elevada que poseen, del orden del ± 0,2%.

La calibración periódica de los manómetros patrón se consigue mediante el *comprobador de manómetros de pesas* llamado también *de peso muerto (dead weight tester)* (figura 10.6a). Consiste en una bomba de aceite o de fluido hidráulico con dos conexiones de salida, una conectada al manómetro patrón y la otra a un cuerpo de cilindro dentro del cual desliza un pistón de sección calibrada que incorpora un juego de pesas. La comprobación se lleva a cabo accionando la bomba hasta levantar el pistón que soporta las pesas calibradas. Con la mano se hace girar este pistón. Su giro libre indica que la presión es la adecuada, ya que el conjunto pistón-pesas está flotando sin roces.

Existen tipos de pistones de baja y de alta presión, con juegos de pesas que permiten obtener márgenes muy variados (por ejemplo, 0-20, 20-100, 30-150, 70-350 bar).

Un comprobador de manómetros de pesas puede alcanzar una exactitud del ± 0,06%, y los pistones y las pesas utilizados pueden certificarse a ± 0,008%. El uso frecuente del comprobador puede degradar la exactitud en ± 0,015% por año, por lo que puede ser necesaria una recertificación periódica.

La exactitud general de la medida es de ± 0,1%.

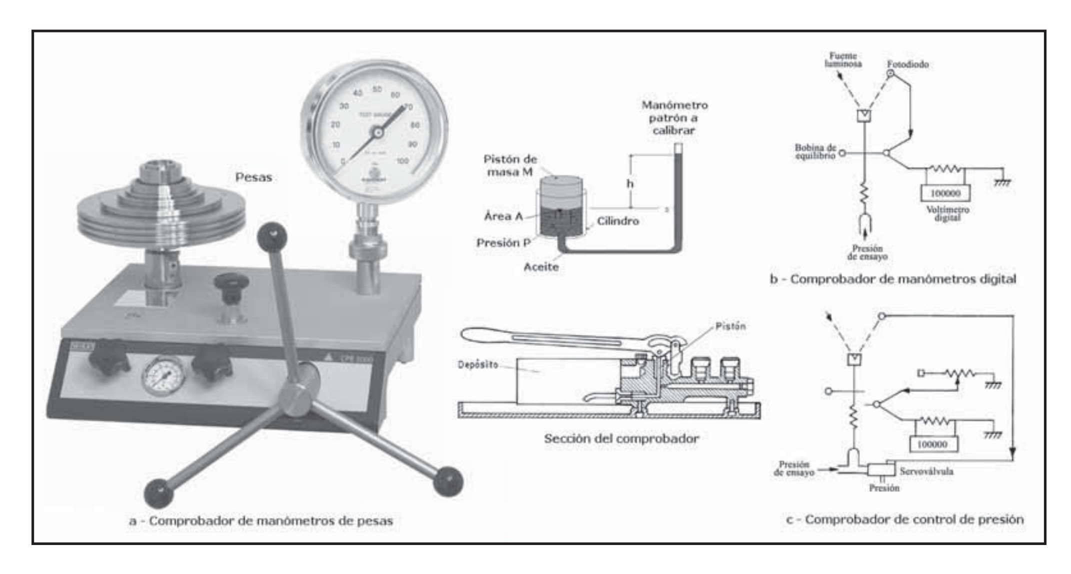


Figura 10.6 Comprobador de manómetros de peso muerto, portátil y digital

Otro uso es la generación de presiones de gas, o bien aire, o bien N_2 para otras calibraciones.

El *comprobador de manómetros digital* (figura 10.6b) consiste en un tubo Bourdon con un espejo soldado que refleja una fuente luminosa sobre un par de fotodiodos equilibrados. Se genera así una señal de corriente que crea un par igual y opuesto al de la presión que actúa sobre el tubo Bourdon. Una resistencia de exactitud crea una señal de tensión directamente proporcional a la presión del sistema. La exactitud del comprobador de manómetros digital alcanza el ± 0,003% de toda la escala, con una estabilidad del ± 0,005% de la lectura.

Complementando el instrumento anterior con potenciómetros de ajuste y una servoválvula, se obtiene un *comprobador de presión de exactitud* (figura 10.6c). Añadiendo un ordenador y el software adecuado se consigue una automatización de la calibración con salida gráfica y por impresora, lo que permite satisfacer los requerimientos de la norma de calidad ISO 9000.

Los c*alibradores de presión portátiles* (figura 10.7) son un buen sustituto del banco de pruebas de instrumentos descrito para presiones hasta 20 bar. Mediante una bomba manual pueden generar vacíos de hasta -800 mbar y presiones de hasta 20 bar. Los resultados de la calibración pueden almacenarse en la memoria del instrumento y analizarse más adelante o transferirse a un ordenador vía la interfase RS232. El sistema de calibración integrado permite el uso de la norma de calidad ISO9000. El calibrador alcanza una exactitud del ± 0,05% de la lectura de presión efectuada.

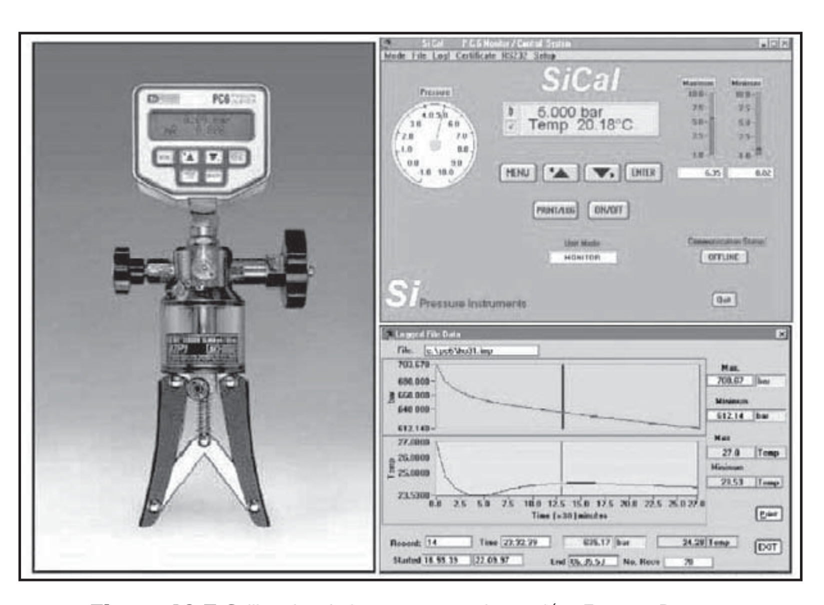


Figura 10.7 Calibrador de instrumentos de presión. Fuente: Beamex

Las *maletas de calibración neumáticas* consisten en un pequeño compresor de aire sin aceite (aros de grafito) apto para alimentar dos o tres instrumentos a la presión mínima de 2 Kg/cm^2, a fin de acoplarle un manorreductor que proporcione la presión de alimentación de 1,4 Kg/cm^2.

Esta maleta de comprobación permite calibrar los instrumentos neumáticos de campo o de panel, o bien simular las presiones obtenidas en los instrumentos de nivel de diafragma o en bajas presiones. Si no se dispone de ella, puede utilizarse como fuente de aire la propia de la planta y emplear para la calibración manómetros patrón o columnas de mercurio.

Para presiones bajas, del orden de 1 bar o vacío, se emplean *columnas de mercurio* portátiles o de fijación mural, y para la medida de presiones más bajas se utilizan *columnas de agua* hasta 2,5 m de longitud.

Los *transmisores de presión inteligentes* son compatibles con sensores de capacidad o piezoresistivo y contienen un microprocesador, una memoria no-volátil, un convertidor analógico-digital y un formato de comunicaciones con el sistema de control.

La configuración de un transmisor de presión inteligente se efectúa seleccionando los parámetros de operación (número de código, valores del campo de medida y las unidades de ingeniería). La comprobación de la calibración (que ya ha sido efectuada en fábrica y no precisa de ajustes) puede realizarse aplicando una presión estándar.

Los modelos existentes en el mercado disponen de autodiagnóstico y permiten la configuración y la comprobación remotas del transmisor a través de un intercomunicador portátil o bien desde el propio sistema central de control.

El método usual de comprobación es el ensayo del transmisor (comprueba la integridad del circuito y la compatibilidad del software) y la integridad del lazo (el transmisor se convierte en una fuente de corriente que genera cualquier valor entre 4 y 20 mA c.c., lo que permite comprobar la bondad de los instrumentos ligados al lazo de control). Estas comprobaciones pueden llevarse a cabo desde cualquier punto del transmisor, de la línea o del receptor, o bien a distancia por infrarrojos.

Por otro lado, el transmisor dispone de autodiagnóstico que detecta problemas internos y que, a través del software de comunicaciones, alerta automáticamente al operador. El operador, por su parte puede iniciar cuando lo desee una rutina completa de autodiagnóstico y recibe un mensaje detallado describiendo el tipo y las condiciones de la avería.

10.3.2 Caudal

Los *instrumentos de presión diferencial de medida de caudal* utilizan una columna de agua o de mercurio (o un patrón digital) y un compresor o la fuente de aire de la planta.

Por ejemplo, en un transmisor de presión diferencial de campo de medida de 2.500 mm c.d.a. (columna de agua) se conectará la toma de alta presión a un tubo con agua hasta una altura de 2,5 m y la toma de baja presión a la atmósfera, para simular el 100% de la variable (o bien a manómetros patrón); para valores intermedios de calibración será necesario convertir las lecturas de caudal, leídas en el instrumento, en los valores de la presión diferencial introducidos en la toma de alta del aparato.

En la tabla 10.2 se da la correspondencia entre estos límites.

En un instrumento de presión diferencial inteligente la configuración se efectúa seleccionando los parámetros de operación (número de código, valores del campo de medida, constante de tiempo de amortiguamiento y las unidades de ingeniería). La comprobación de la calibración (que ya ha sido efectuada en fábrica y no precisa de ajustes) puede realizarse aplicando una presión estándar de forma parecida a la descrito en los transmisores inteligentes de presión.

Los *rotámetros* no pueden calibrarse, sólo pueden comprobarse, exceptuando la parte transmisora cuando la llevan incorporada.

Uno de los motivos de la calibración de los *medidores de turbina* suele ser la erosión, a lo largo del tiempo, si el fluido es algo agresivo (y no se han seleccionado bien los materiales en contacto con el

fluido), o si falla el filtro que se coloca aguas arriba del medidor. En estos casos deja de cumplirse la curva de ciclos por litro (que es prácticamente una recta horizontal) que da el fabricante, y la única solución es el cambio del rotor.

La comprobación del medidor de turbina se reduce a hacer pasar varios caudales conocidos (medidos con otro medidor de turbina de exactitud en un laboratorio, o bien con una unidad portátil para una comprobación rápida o bien acoplando dos turbinas en serie durante un tiempo suficiente) y verificar la indicación o la señal de salida para cada uno de ellos.

Presión diferencial (lineal)	Caudal (escala raíz cuadrada)	Caudal (escala lineal)	0,2 - 1 bar	3 - 15 psi	4 - 20 mA c.c.	Escala 0-100 lineal	Escala 0-10 raíz cuadrada
0	**0**	**0**	**0,2**	**3**	4	0	0
1	**1**	**10**				1	
4	**2**	**20**				4	
9	**3**	**30**				9	
10	**3,2**	**32**	**0,208**	**3,12**	4,16	10	1
16	**4**	**40**				16	
20	**4,5**	**45**	**0,232**	**3,48**	4,64	20	2
25	**5**	**50**	**0,25**	**3,75**	5	25	2,5
30	**5,5**	**55**	**0,272**	**4,08**	5,44	30	3
36	**6**	**60**				36	
40	**6,3**	**63**	**0,328**	**4,92**	6,56	40	4
49	**7**	**70**				49	
50	**7,1**	**71**	**0,4**	**6**	8	50	5
60	**7,7**	**77**	**0,488**	**7,32**	9,76	60	6
64	**8**	**80**				64	
70	**8,4**	**84**	**0,592**	**8,88**	11,84	70	7
75	**8,7**	**87**	**0,65**	**9,75**	13	75	
80	**8,9**	**89**	**0,712**	**10,68**	14,24	80	8
81	**9**	**90**				81	
90	**9,5**	**95**	**0,848**	**12,72**	16,96	90	9
100	**10**	**100**	**1**	**15**	20	100	10

Tabla 10.2 Relaciones presión diferencial-caudal

El *medidor de remolino* y el *vórtex* se han calibrado en fábrica y no necesitan ajustes especiales. Sin embargo, si se cambia el sensor o bien si cambian las condiciones de servicio, es necesario reajustarlo, siguiendo las instrucciones de operación.

Los *medidores volumétricos* (desplazamiento positivo) pueden verificarse en el lugar en que están instalados si se dispone de medios para intercalar en serie otro medidor patrón que permitirá comprobar las medidas.

Los *medidores directos de caudal masa* se calibran en la propia instalación con el mismo fluido de trabajo, asegurando un caudal masa constante y midiendo, en un sistema receptor, la masa del fluido corregida y el tiempo que ha transcurrido en la experiencia con un cronómetro de exactitud. Pueden verificarse en el lugar en que están instalados si se dispone de medios para intercalar en serie otro medidor patrón que permitirá comprobar las medidas.

10.3.3 Nivel

La *calibración de los instrumentos de nivel* basados en la presión hidrostática se realiza de forma análoga a los instrumentos de presión, transformando la altura de líquido al valor correspondiente de la presión a simular.

Los medidores de nivel de presión diferencial se calibran de forma similar a los utilizados en la medida de caudal por presión diferencial. Es preciso tener en cuenta las condiciones particulares del transmisor, es decir, si se instalará en un tanque abierto o cerrado y si dispone de resorte de supresión o de elevación para corregir la condensación en el lado de baja presión del instrumento, o compensar su instalación en un punto de cota muy inferior a la base del tanque. En la figura 10.8 puede verse un esquema de calibración de los instrumentos basados en la presión hidrostática.

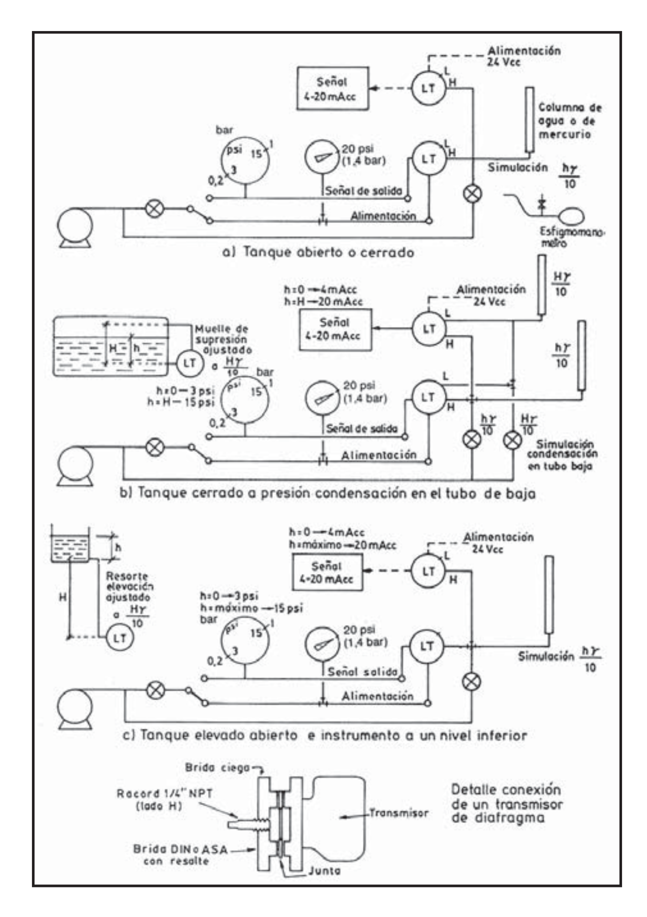


Figura 10.8 Esquema de calibración de instrumentos de nivel de presión hidrostática

De forma análoga, se calibran los *instrumentos de nivel de desplazamiento* y los basados en las *características eléctricas* del líquido.

Los medidores de nivel de *radiación* requieren un extremo cuidado en su manejo y es preciso seguir fielmente las instrucciones descritas en el manual del fabricante, y las normas y recomendaciones vigentes por los peligros que entraña la no observancia de los mismos.

10.4 Calibración de instrumentos de temperatura

Para la calibración de instrumentos de temperatura se emplean *baños de temperatura (calibradores de bloque metálico,* de *baño de arena* y de *baño de líquido), hornos, comprobadores potenciométricos y de puente de Wheatstone* y *comprobadores universales*.

El calibrador de *bloque metálico* (figura 10.9a) consiste en un bloque metálico, calentado por resistencias, con un controlador de temperatura de exactitud (± 2 °C) adecuado para aplicaciones de alta temperatura (-25 °C a 1200 °C). El control se realiza con aire comprimido, lo que permite reducir la temperatura desde 1200 °C a la ambiente en unos 10-15 minutos. En el calibrador hay orificios de inserción para introducir un termopar patrón y la sonda de temperatura a comprobar.

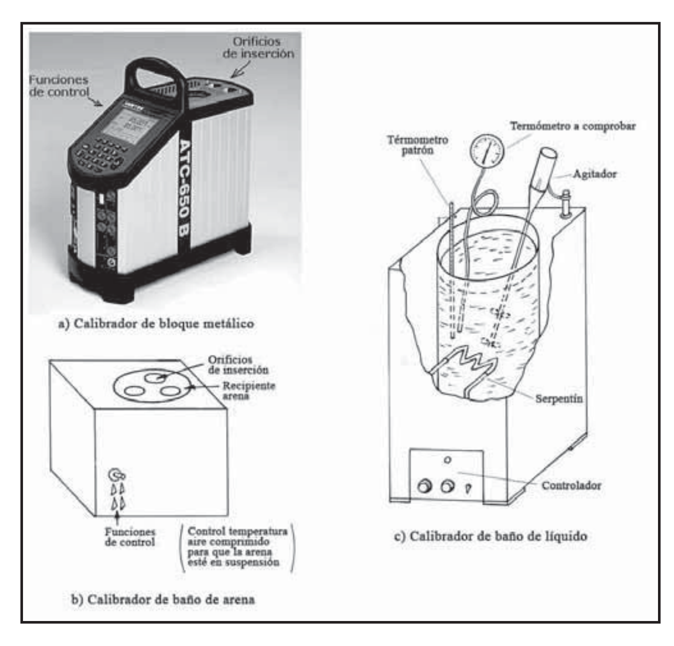


Figura 10.9 Baño de temperaturas. Fuente: Ametek

El calibrador de *baño de arena* (figura 10.9b) consiste en un depósito de arena muy fina que contiene tubos de inserción para la sonda de resistencia o el termopar patrón y para las sondas de temperatura a comprobar.

La arena caliente es mantenida en suspensión por medio de una corriente de aire, asegurando así la distribución uniforme de temperaturas a lo largo de los tubos de inserción.

El calibrador de *baño de líquido* (figura 10.9c) consiste en un tanque de acero inoxidable lleno de líquido con un agitador incorporado, un termómetro patrón sumergido y un controlador de temperatura que actúa sobre un conjunto de resistencias calefactoras. Se utilizan varios tipos de fluidos dependiendo de la temperatura de trabajo, tricloroetileno (-80 °C a temperatura ambiente), etilenglicol y agua (-20 °C a temperatura ambiente), aceite fluido y aceite de silicona (ambiente a 260 °C) y sales (220 °C a 700 °C).

Los *hornos de temperatura* son hornos de mufla calentados por resistencias eléctricas y con tomas adecuadas para introducir los elementos primarios del instrumento a comprobar.

Dentro del horno pueden introducirse crisoles con sales específicas que funden a temperaturas determinadas. En la tabla 10.3 puede verse la escala internacional de temperaturas de 1990, basada en 17 puntos fijos que cubren un intervalo de temperaturas desde -270,15 °C hasta 1.084,62 °C.

Punto fijo nº	Cuerpo	Estado	Temperatura °C
1	He	Vapor	-270,15 a -268,15
2	E - H_2	Punto triple	-259,3467
3	E - H_2	Vapor	-256,16
4	E - H_2	Vapor	-252,85
5	Neón	Punto triple	- 248,5939
6	O_2	Punto triple	-218,7916
7	Ar	Punto triple	-189,3442
8	Hg	Punto triple	-38,8344
9	H_2O	Punto triple	0,01
10	Ga	Fusión	29,7646
11	In	Solidificación	156,5985
12	Sn	Solidificación	231,928
13	Zn	Solidificación	419,527
14	Al	Solidificación	660,323
15	Ag	Solidificación	961,78
16	Au	Solidificación	1064,18
17	Cu	Solidificación	1084,62

Tabla 10.3 *Escala internacional de temperaturas (año 1990)*

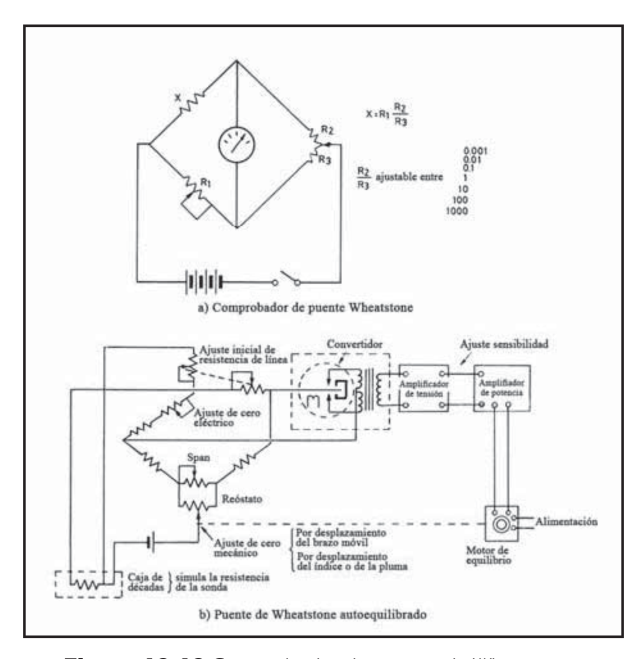


Figura 10.10 Comprobador de puente de Wheatstone

Calibración de termómetros de resistencia e instrumentos de puente de Wheatstone

Para comprobar una *sonda de resistencia* se mide su valor a varias temperaturas y se compara con la indicada en las tablas de resistencia. Se utiliza un comprobador de puente de Wheatstone (figura 10.10).

La resistencia desconocida X equivale a:

$$X = R1 \times \frac{R2}{R3}$$

en la que $R1$ es una resistencia que se hace variar en múltiplos de 10 (9×1, 9×10, 9×100, 9×1000), y la relación $R2/R3$ varía desde 0,001, 0,01, 0,1, 1, 10, 100, 1000.

Para comprobar un instrumento de temperatura de puente de Wheatstone se emplean cajas de resistencias patrones (caja con décadas) que simulan los valores que, la sonda de resistencia en campo, irá tomando de acuerdo con las temperaturas del proceso. La exactitud correspondiente a las cajas patrones es elevada, del orden del 0,01% al 0,2% del campo de medida.

Calibración de termopares e instrumentos galvanométricos o potenciométricos

Se efectúa con los comprobadores potenciométricos (figura 10.11). Estos se emplean para comprobar las características f.e.m.-temperatura de los termopares, para medir la temperatura con un termopar y para calibrar los instrumentos galvanométricos y potenciométricos. El aparato puede medir y generar f.e.m. en c.c. En los modelos simples es necesario compensar la temperatura de la unión fría.

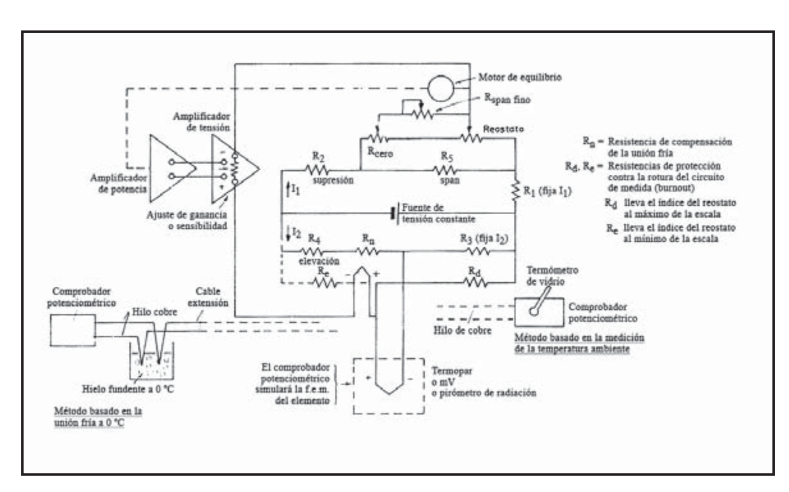


Figura 10.11 Comprobador potenciómetrico

Pueden presentarse los siguientes casos:

a) Comprobación del estado de un termopar

   Se sitúa el termopar en un baño de temperaturas o en un horno, según sea la temperatura a comprobar, y se coloca un termómetro de vidrio en la caja del potenciómetro de comprobación y se procede del modo siguiente:

   1. Se determina la temperatura de la unión fría o temperatura ambiente t_a del potenciómetro, por lectura del termómetro de vidrio.

2. Se lee la f.e.m. generada por el termopar en el potenciómetro.
3. En las tablas de f.e.m. referidas a 0 °C se determinan los milivoltios correspondientes a la temperatura de la unión fría.
4. La suma algebraica de los dos valores anteriores de f.e.m. se pasa al valor correspondiente de temperatura mediante la tabla de f.e.m. correspondiente al termopar.

   Los valores se suman, ya que dentro del potenciómetro se encuentra la junta fría y la f.e.m. leída es menor en un valor V_a (correspondiente a t_a) a la V que se obtendría si la unión fría estuviera a 0 °C.
5. La temperatura obtenida debe corresponder, dentro de los límites de exactitud del termopar, a la temperatura del baño o del horno. En caso de no ser así, el termopar es defectuoso y debe ser sustituido por otro nuevo.

b) Calibración de un instrumento de temperatura galvanométrico o potenciométrico

Se coloca un termómetro de vidrio en la caja del instrumento y se procede del modo siguiente:

1. Se determina la temperatura de la unión fría del instrumento por lectura del termómetro de vidrio.
2. En las tablas de f.e.m. referidas a 0 °C se determinan los milivoltios correspondientes a la temperatura a verificar del instrumento.
3. La diferencia algebraica de los valores anteriores se sitúa en el comprobador, debiendo leer el instrumento la temperatura a verificar.

   Los valores se restan, ya que el instrumento tiene compensación de temperatura ambiente y, si ésta aumenta, la f.e.m. útil disminuye en el valor correspondiente a la f.e.m generada por el termopar a esta temperatura, situándose siempre el índice del instrumento en el valor de la temperatura de la unión caliente.

10.4.1 Pirómetros de radiación

Los *pirómetros de radiación* pueden calibrarse captando la radiación de un cuerpo negro de temperatura conocida. El cuerpo puede situarse dentro de un horno de temperatura y enfocar el pirómetro hacia el cuerpo a través de un agujero practicado previamente en el horno. El cuerpo estará en condiciones de cuerpo negro ya que absorberá todas las radiaciones y no emitirá ninguna y, por lo tanto, su coeficiente de emisión será la unidad.

10.4.2 Transmisores de temperatura inteligentes

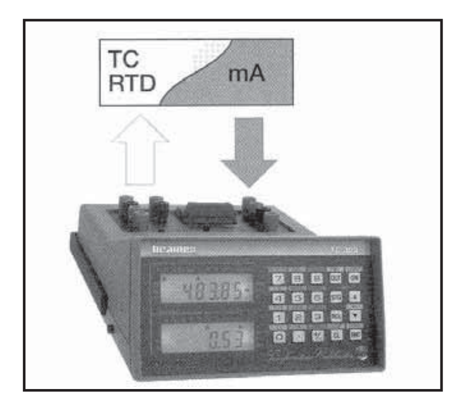
Los *transmisores de temperatura inteligentes* son compatibles con una amplia variedad de sensores: sondas de resistencia Pt100, Pt200, Pt500, de dos, tres y cuatro hilos, sondas de resistencia de níquel de dos, tres y cuatro hilos, termopares tipo B, E, J, K, R, S, T, impedancia externa de 0 a 2000 ohmios, f.e.m. de -10 a 100 milivoltios y escalas en unidades de ingeniería, ohmios, milivoltios, grados Farenheit, °C, grados Kelvin o Rankine. El instrumento contiene un microprocesador, una memoria no volátil, un convertidor analógico-digital y un formato de comunicaciones con el sistema de control.

Los modelos existentes en el mercado disponen de autodiagnóstico y permiten la configuración y la comprobación remotas del transmisor a través de un intercomunicador portátil o bien desde el propio sistema central de control. El método usual de comprobación es el ensayo del transmisor (comprueba la integridad del circuito y la compatibilidad del software) y la integridad del lazo (el

transmisor se convierte en una fuente de corriente que genera cualquier valor entre 4 y 20 mA c.c., lo que permite comprobar la bondad de los registradores, indicadores u otros aparatos ligados al lazo de control).

10.4.3 Calibradores universales de temperatura

Los *calibradores universales* de temperatura (figura 10.12) reúnen en un solo aparato las características de los comprobadores potenciométricos y de puente de Wheatstone descritos, midiendo y generando señales de termopar, termoresistencia, ohm, mV, V y mA. Son muy exactos (± 0,02%) y pueden estar dotados de capacidad de comunicación RS232 con un ordenador. Un programa de calibración guía directamente al operador, proporcionándole las instrucciones de calibración necesarias. Los resultados documentados cumplen los requisitos de la norma de calidad ISO 9000.



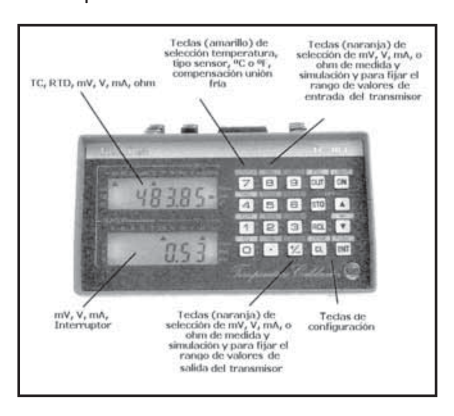


Figura 10.12 Calibrador de temperatura. Fuente: Beamex

10.5 Calibración de válvulas de control

Para calibrar una *válvula de control* se ajusta correctamente el tornillo de cero y el de multiplicación para que la carrera completa se efectúe de 3 a 15 psi (0,2 a 1 bar).

Siguiendo el procedimiento general, la calibración se realiza del modo siguiente:

a) Sin aire sobre la válvula, se acopla un microrruptor con una luz piloto o un palpador de exactitud en un saliente del vástago (o bien se apoya un dedo sobre el vástago) para detectar el inicio de la carrera del obturador de la válvula.

   Se acciona el manorreductor para aumentar, poco a poco, la señal y a 0,2 bar (3 psi), la válvula debe iniciar ya su abertura; si no ocurre así, se acciona el tornillo de cero (posición A de la figura 10.13), que regula la carrera del vástago, lo justo para que la válvula empiece a abrir a 0,2 bar (3 psi), notándose el punto correcto porque cuesta girar el tornillo. En esta posición se fija la plaquita exterior de indicación de carrera de la válvula de modo que marque el 0%.

b) Seguidamente, con el manorreductor se da aire a la presión de 1 bar (15 psi) y el indicador de posición debe marcar el 100% de la carrera. Si no es así, se aprieta el tornillo de multiplicación (*span*) B que regula el recorrido del muelle hasta que el índice señale el 100%.

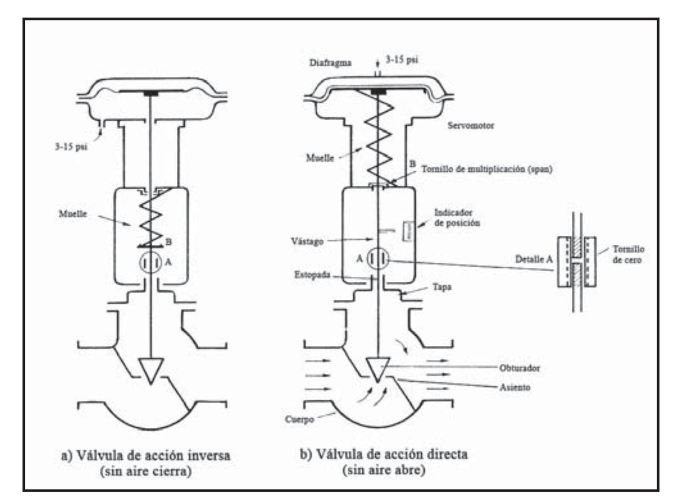
c) Se repiten, nuevamente, los ajustes de 0% y 100% el número suficiente de veces para que la válvula quede calibrada correctamente.

Viga para suspender la válvula
Al servomotor
Al posicionador
Válvula drenaje pistón
Bomba de agua
Presión pistón
Al cuerpo de válvula
Manorreductores
Regulación presión
Distribuidor
Brida móvil ciega
Desagüe
a) Aspecto general

0-2 0-5 0-10 0-16 0-25 0-50 0-100 0-200
Cuerpo válvula
Intensificador presión
Válvula seguridad
Válvula aisladora
agua
AS
Al servomotor válvula
Brida fija
Brida móvil
Regulación presión
Regulación fina
Al posicionador válvula
0-5 bar
Alimentación agua
Bomba
Desagüe
Depósito
b) Esquema

Estopada
Brida ciega
Prueba estanqueidad válvula
Prueba estanqueidad estopada
Prueba de pérdidas
Prueba del servomotor
3-15 psi (0,2-1 bar)
20 psi (1,4 bar)
Prueba del posicionador

RAPTOR
Valve Characterization
Test Point Number
Inlet Pressure Readings (P1)
Discharge Pressure Readings (P2)
Flow Coefficients
Differential Pressure Readings (dP)
Flow Readings
Data Acquisition
Power Supply
Valve Position
System Messages



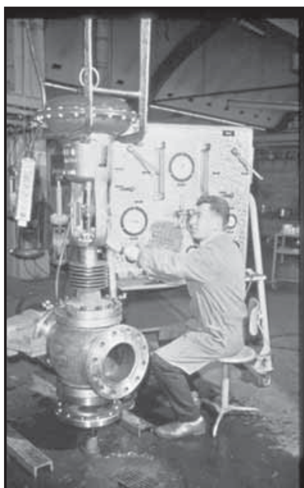


Figura 10.13 *Calibración de una válvula de control: Fuente: Flor Systems*

Los pasos anteriores se han realizado con una válvula de acción inversa (sin aire, cierra). La calibración de una válvula de acción directa (sin aire, abre) se efectuaría a la inversa, es decir, a 1 bar (15 psi) la válvula debería estar cerrada, mientras que a 0,2 bar (3 psi) estaría completamente abierta; los tornillos a ajustar serían, en el primer caso, el de multiplicación (B) y, en el segundo, el de cero (A).

Otras pruebas que pueden realizarse en las válvulas de control mediante un banco de pruebas son: prueba hidrostática, prueba de estanqueidad de la estopada, prueba de pérdidas de la válvula con el obturador en posición de cierre, prueba del servomotor y prueba del posicionador.

Los posicionadores neumáticos se calibran siguiendo el procedimiento general de calibración mientras que los electroneumáticos se calibran a través de la parte electrónica.

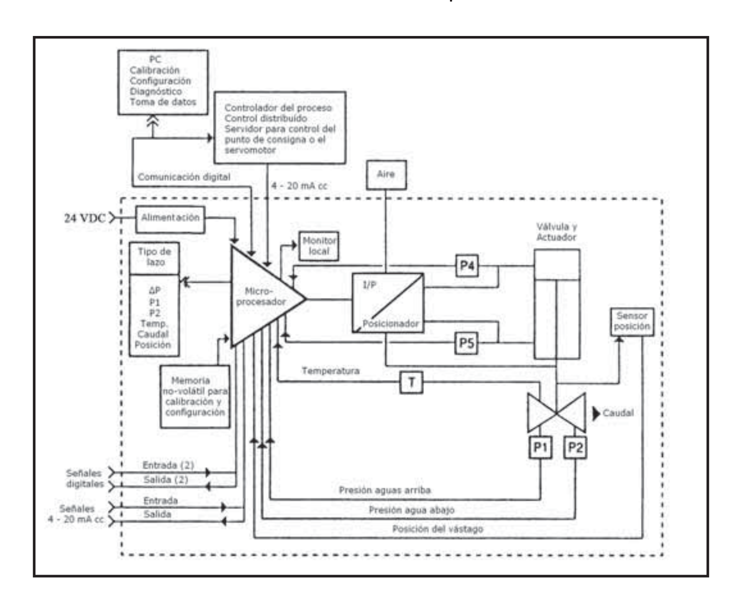


Figura 10.14 Posicionador electroneumático/digital inteligente

El *posicionador inteligent*e (figura 10.14) dispone de una interfase con protocolos de comunicación *HART (Highway Addressable Remote Transducer)* o *Fieldbus FOUNDATION* (u otro sistema de comunicaciones) y de un microprocesador, lo que le permite realizar diversas funciones, aparte de la propia del posicionador que es la de posicionar el obturador de la válvula, y convertir la señal digital a señal neumática de salida hacia el servomotor neumático de la válvula. Dispone de las siguientes características de calibración:

- Operación, calibración y configuración, locales y remotas, e histórico.
- Caracterización de la válvula a las curvas lineal, isoporcentual, apertura rápida y personalizada por el usuario.
- Rozamiento e histéresis de la válvula.
- Longitud recorrida por el vástago de la válvula (odómetro).
- Calibración del margen de recorrido y de la velocidad del vástago.
- Ajuste automático del recorrido de la válvula.
- Ajuste de la fuerza de asentamiento del obturador de la válvula.
- Compatibilidad con actuadores de acción directa o inversa.
- Configuración del cero y el *span* para operación con margen partido.
- Entradas adicionales (interruptores final de carrera, etc.).
- Datos de fábrica y funcionamiento (firmas).

Como el posicionador conoce por retroalimentación la posición del vástago de la válvula, una función de diagnóstico incorporada permite conocer el estado del mantenimiento de la válvula, del actuador y del propio posicionador. De este modo, el servicio de mantenimiento puede realizar su trabajo cuando sea realmente necesario, al poder visualizar a distancia datos tales como el recorrido total del vástago desde la puesta en servicio de la válvula, el rozamiento de la estopada, la velocidad instantánea del vástago, el registro del tiempo de funcionamiento de la válvula, los datos históricos de calibración, la configuración de la válvula y la base de datos iniciales del fabricante.

Esta función avanzada de mantenimiento predictivo permite averiguar el estado de la válvula sin desmontarla. La "firma" (figura 10.15), es decir, el registro gráfico del estado del conjunto válvula-actuador (medida de la histéresis, zona muerta y linealidad, gráficos o "firmas" del posicionador, del asentamiento, del actuador, de la presión de alimentación con relación al recorrido del vástago) puede compararse con "firmas previas" grabadas en la puesta en servicio y en estados posteriores para descubrir cambios, en el funcionamiento de la válvula, antes de que causen problemas reales en el control del proceso. Puede también realizarse un diagnóstico del proceso y de las comunicaciones y un análisis de fallos. La información puede obtenerse directamente en la válvula, o a través de un ordenador personal o de una consola de operador en la sala de control.

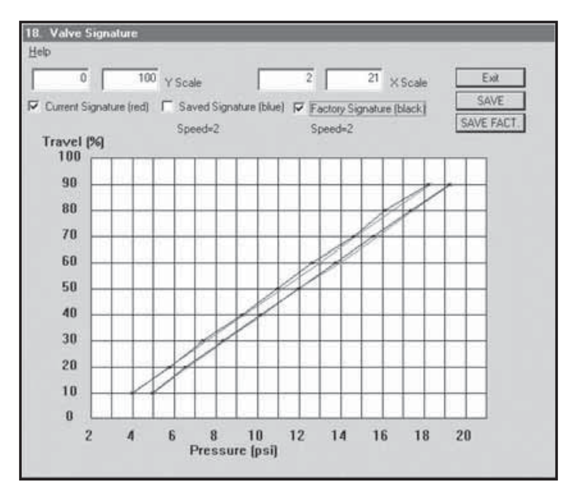


Figura 10.15 Gráfico de firma de la válvula

10.6 Calibración de instrumentos digitales

Aunque los procedimientos dependen del fabricante, y es recomendable leer y aplicar las instrucciones del manual, la marcha general es la que veremos a continuación.

10.6.1 Controlador universal o multifunción

Se llama el programa *SET UP*, donde se dispone de los valores de las entradas de alta y baja calibración. Se entra el modo de calibración, se aplica la señal de referencia y se pulsa la tecla *CAL* (calibración). El microprocesador del controlador establece automáticamente el campo de medida, eliminando, de este modo, los ajustes mecánicos. Se anotan los valores de las constantes de calibración, con lo que una nueva recalibración a los mismos valores del campo de medida que pueda efectuarse más adelante será muy sencilla, bastando entrar los valores conocidos de las constantes de calibración.




Figura 10.16 Técnico de mantenimiento calibrando un transmisor de presión diferencial con un calibrador multifunción. Fuente: Beamex MC5, MC5P

Existen bancos de calibración aptos para unos 7 o más canales para señales de temperatura, presión y eléctricas que pueden almacenar hasta 70.000 resultados y con comunicaciones *HART* y *Foundation Fieldbus*.

10.6.2 Resto de instrumentos de la planta

El software analiza los datos e interpreta los síntomas y fallos, generando una acción recomendada de mantenimiento. De este modo, el técnico de mantenimiento le basta pulsar unas pocas teclas para comprobar a distancia un instrumento, configurarlo y calibrarlo. Y el equipo de mantenimiento puede vigilar el estado de los instrumentos a través del monitor, con lo que sabe inmediatamente si existe un problema, lo que, evidentemente, ahorra paros de la planta inesperados.




Figura 10.17 Banco de calibración y transmisor electrónico temperatura por termoresistencia. Fuente: Beamex

Se crea, además, una base de datos de todos los instrumentos comunicados con el sistema y la gestión de su mantenimiento.

10.7 Mantenimiento de instrumentos

Los instrumentos requieren un mantenimiento para su funcionamiento. Este mantenimiento puede ser:

- **Correctivo.** Los instrumentos se reparan cuando fallan por completo o cuando ya están en su etapa final de desgaste cuando su coste de servicio es extremadamente alto. En el caso de instrumentos en lazos críticos, puede presentarse un paro parcial o total de la planta. El Departamento de Mantenimiento debe reparar los instrumentos implicados posiblemente en el peor momento y con prisas y sin disponer de los aparatos y las piezas de recambio correspondientes.

  En los controladores digitales y en el control distribuido e integrado, el sistema dispone de un autodiagnóstico que avisa al Departamento de Mantenimiento de los fallos y de su localización, facilitando la reparación por sustitución de la tarjeta electrónica donde esté el componente averiado.
- **Preventivo.** Los instrumentos se revisan a intervalos regulares de acuerdo con su historial de averías en la planta y las recomendaciones del fabricante. Las revisiones se planifican por anticipado, presumiblemente, en las fechas de paro de la planta y estando el servicio preparado con los aparatos, piezas de recambio y recursos humanos necesarios. Una desventaja de este método es que, en muchas ocasiones, se revisa un instrumento sin necesidad, con lo cual, puede posiblemente alterarse su funcionamiento, lo que puede conducir a un fallo prematuro del mismo.
- **Predictivo.** Los instrumentos se revisan de acuerdo con el dictamen realizado mediante aparatos que avisan del posible fallo del instrumento en un tiempo determinado. Si bien el mantenimiento predictivo está muy extendido en máquinas rotativas, todavía no está desarrollado suficientemente en los instrumentos.

La seguridad de funcionamiento de los elementos de medida y transmisión depende de la correcta aplicación y de la instalación adecuada de los aparatos. Por ejemplo, un medidor de turbina que mida caudales de líquidos con partículas en suspensión, y que esté instalado sin filtro, tendrá seguramente una vida útil corta, aparte de indicar caudales erróneos todo el tiempo que continúe funcionando con las palas de la turbina desgastadas. Y un medidor de caudal de presión diferencial que utilice una placa-orificio en fluidos con sólidos abrasivos en suspensión, dará lugar a una degradación gradual de la medida, ya que el orificio de la placa irá desgastándose con el tiempo y perderá sus dimensiones y su forma.

Aunque la fiabilidad de los instrumentos depende mucho de la aplicación local en cada planta, por las diferentes condiciones de servicio y ambientales a que están sometidos, es útil tener una idea aproximada del llamado *tiempo medio entre fallos* de los aparatos. La tabla 10.4 ilustra estos valores para cada tipo de instrumento, debiendo señalar que los valores indicados son aproximados.

Es útil conocer el tiempo medio entre fallos del lazo de control, el cual puede determinarse por la inversa de la suma de inversas de los tiempos medios de cada instrumento. Por ejemplo, un lazo de control constituido por un transmisor de presión, un presostato de alarma, una válvula de solenoide y una válvula todo-nada, tendrá el valor:

$$Tiempo\ medio = \frac{1}{(1/250)+(1/250)+(1/4000)+(1/2500)} = 116\ dias$$

Variable	Instrumento	Tiempo medio entre fallos (años)
Presión		0,1 - 5
Caudal	Placa-orificio, Tobera, Tubo Venturi	0,2 - 5
	Turbina	0,1 - 1
	Desplazamiento positivo	0,1 - 1
	Magnético	0,5 - 1
Nivel	Burbujeo	1 - 2
	Presión Diferencial	1 - 5
	Flotador	0,2 - 2
	Vidrio	0,1 - 5
Temperatura		0,5 - 2
Densidad	Nuclear	1 - 3
	Mecánico	0,1 - 0,5
Análisis	pH y ORP	0,1 - 0,4
Conductividad		0,1 - 0,4
	Transmisor	0,7
	Válvula todo-nada	7
	Válvula de solenoide	7
	Microrruptor	0,7

Tabla 10.4 *Tiempo medio entre fallos de los instrumentos. Fuente U.S. Environmental Protection Agency*

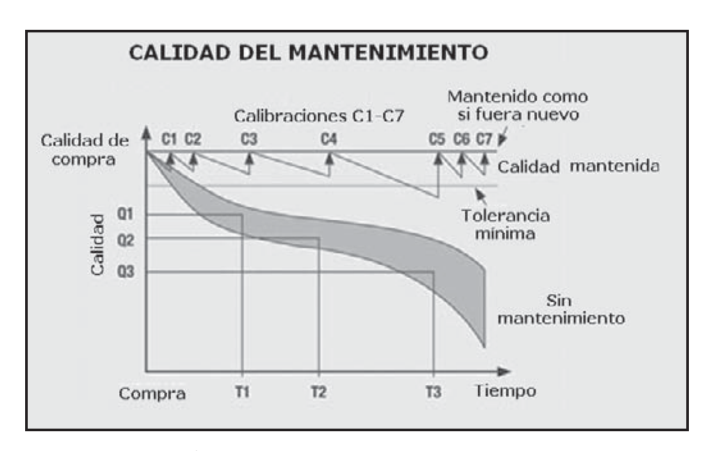


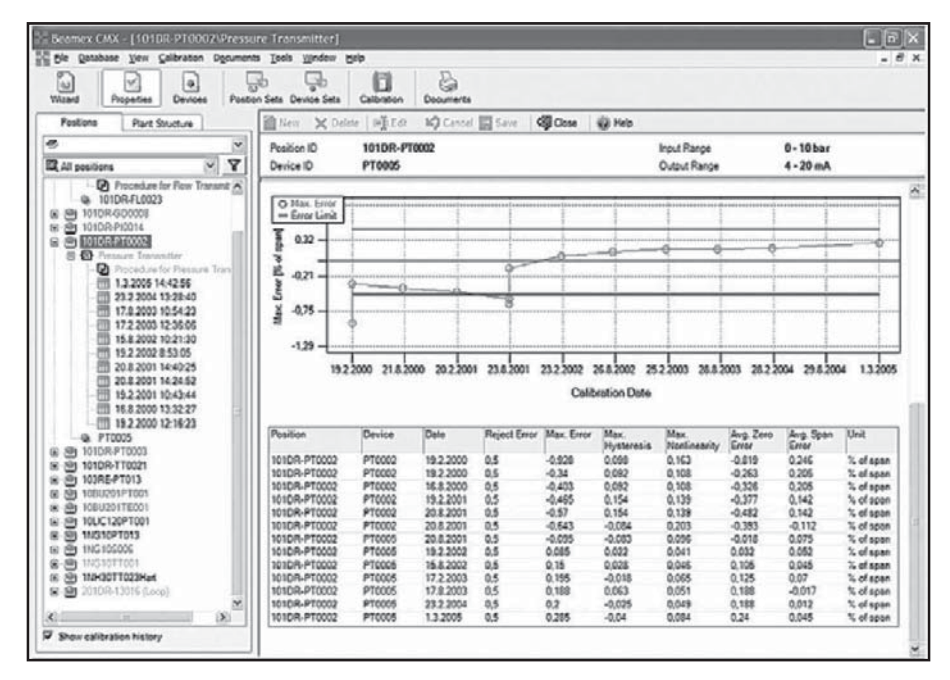
Figura 10.18 *Comparación entre la calidad mantenida mediante calibraciones periódicas y una política de mantenimiento nula. Fuente: Beamex*

Para aumentar la fiabilidad del sistema, el proyectista puede aumentar la fiabilidad de cada instrumento individual, con especial énfasis en los lazos críticos, especificando instrumentos con autodiagnóstico y controladores con autoajuste, estableciendo programas de mantenimiento preventivo y duplicando los aparatos. Por ejemplo, es obvio que el cable de la vía de comunicaciones del control distribuido acostumbra a ser redundante para aumentar la seguridad de funcionamiento del control de la planta.

Aparte de la lectura de la tabla 10.4, que puede servir de guía para establecer la periodicidad del mantenimiento, las plantas de proceso acostumbran a calibrar los instrumentos una vez por año, y dos veces por año en procesos donde la calidad del producto es crítica.

Sin embargo, un análisis de la deriva del instrumento fuera de la exactitud dada por el fabricante o exigida por la propia industria que se refleja en el histórico de mantenimiento del instrumento puede dar la clave para saber la frecuencia de mantenimiento que necesita el aparato de acuerdo con el tipo de servicio que realiza en el proceso. De este modo, se reducen costes y se mejora el rendimiento del instrumento y lo que también es importante la eficacia del servicio de mantenimiento que, de este modo, se concentra en los lazos que lo necesitan sin perder tiempo ni esfuerzos en calibraciones innecesarias.

Además, de este modo, el usuario puede comparar diferentes tipos de instrumentos y de fabricantes en las mismas condiciones de servicio y encontrar aparatos (sensores, etc.) que mantienen su grado de exactitud durante mucho tiempo y no necesitan ser recalibrados. En la figura 10.19 puede verse el gráfico de la frecuencia del mantenimiento de un transmisor de presión PT0005 de margen 0-10 bar y señal de salida 4-20 mA c.c.



Position	Device	Date	Reject Error	Max. Error	Max. Hysteresis	Max. Nonlinearity	Avg. Zero Error	Avg. Span Error	Unit
101DR-PT0002	PT0002	19.2.2000	0,5	-0,928	0,098	0,163	-0,819	0,246	% of span
101DR-PT0002	PT0002	19.2.2000	0,5	-0,34	0,092	0,108	-0,263	0,205	% of span
101DR-PT0002	PT0002	16.8.2000	0,5	-0,403	0,092	0,108	-0,326	0,205	% of span
101DR-PT0002	PT0002	19.2.2001	0,5	-0,465	0,154	0,139	-0,377	0,142	% of span
101DR-PT0002	PT0002	20.8.2001	0,5	-0,57	0,154	0,139	-0,482	0,142	% of span
101DR-PT0002	PT0002	20.8.2001	0,5	-0,643	-0,084	0,203	-0,383	-0,112	% of span
101DR-PT0002	PT0005	20.8.2001	0,5	-0,035	-0,083	0,096	-0,018	0,075	% of span
101DR-PT0002	PT0005	19.2.2002	0,5	0,085	0,022	0,041	0,032	0,052	% of span
101DR-PT0002	PT0005	16.8.2002	0,5	0,15	0,028	0,046	0,106	0,045	% of span
101DR-PT0002	PT0005	17.2.2003	0,5	0,155	-0,018	0,065	0,125	0,07	% of span
101DR-PT0002	PT0005	17.8.2003	0,5	0,188	0,063	0,051	0,188	-0,017	% of span
101DR-PT0002	PT0005	23.2.2004	0,5	0,2	-0,025	0,049	0,188	0,012	% of span
101DR-PT0002	PT0005	1.3.2005	0,5	0,285	-0,04	0,084	0,24	0,045	% of span

Figura 10.19 *Histórico de mantenimiento de un transmisor de presión. Fuente: Beamex*

En plantas de gran tamaño, con numerosos instrumentos y lazos de control, es complicado organizar las funciones de mantenimiento y la confección de la documentación para todas las actividades de mantenimiento.

El instrumentista, una vez establecida la ruta de calibración de los instrumentos y el esquema de calibración (puntos específicos del instrumento, exactitud), sigue los pasos siguientes:

1. Entrada manual de los datos en el calibrador manual portátil, lo que consume tiempo y está sujeto a errores.

2. En la planta, coloca el calibrador en cada instrumento y aplica el valor correcto de la variable (presión, temperatura, etc.), registra las lecturas en el instrumento y las compara con la información disponible para comprobar la exactitud.
3. Si el instrumento falla en el ensayo de calibración, vuelve a repetir el test y en caso negativo, pasa a otro instrumento.
4. Cuando termina, regresa al taller de mantenimiento de instrumentos donde escribe un informe de cada instrumento mediante la información recogida en el calibrador, lo que representa un consumo engorroso de tiempo.
5. El instrumentista guarda el informe para referencias futuras o para demostrar que ha cumplido con su trabajo de calibración.

Procediendo de este modo, el técnico puede emplear 8 horas para calibrar y documentar 8 aparatos.

El software dedicado a la gestión del mantenimiento de instrumentos reduce esta labor y evita errores. Guarda el esquema de calibración de cada instrumento, mantiene las rutas de calibración, carga los esquemas de calibración antes de efectuar los ciclos de calibración y graba los resultados del test en el software de objetivos (AMS = *Asset Management Software*).

De este modo, al regresar el instrumentista al taller, se limita a conectar el calibrador al ordenador y descargar los resultados. El ahorro conseguido con el software es del orden de 20 a 80 euros por aparato.

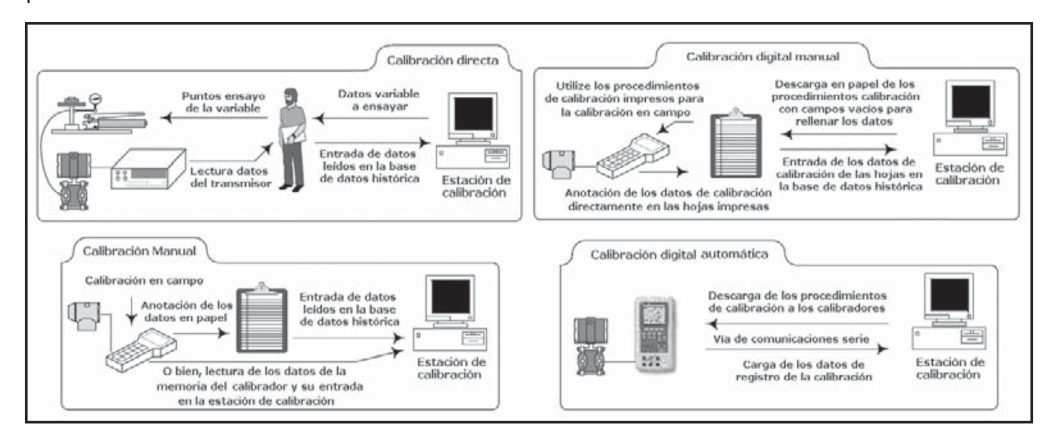


Figura 10.20 Comparación calibración manual y automática

En el mercado se encuentran programas de gestión de mantenimiento, entre los que figuran: AMS de Fisher Rosemount, ASSET MAX de Honeywell, PDM de Siemens, SMARTVISION de ABB, PC20 de Foxboro, etc.

Como beneficios adicionales cabe citar que, en una central nuclear, los parámetros de operación (potencia del reactor, capacidad de refrigeración, etc.), determinados con un sistema de medida cuyas variables se calibraron periódicamente, permitieron pasar de la exactitud en la potencia del ± 2% al ± 0,4%, lo que facilitó un aumento en la producción anual de energía de cada unidad de la central del 1,6%.

En una fábrica de investigación y desarrollo de productos farmacéuticos efectuando más de 8.000 calibraciones/año de numerosas variables (presión, caudal, temperatura, peso, pH, conductividad,

oxígeno disuelto, velocidad, etc.), estiman un ahorro de 200.000 euros/año gracias al tiempo reducido de la calibración, obtenido al utilizar el software de calibración y mantenimiento.

Como resumen de la comparación entre el mantenimiento con instrumentos convencionales neumáticos y electrónicos y el que se realiza con instrumentos inteligentes, el lector puede examinar la figura 10.21, y su elección será clara.



Figura 10.21 Mantenimiento convencional e inteligente

10.8 Normativa de calidad ISO 9000:2000 aplicada a la instrumentación

El organismo ISO, cuyas siglas significan *International Standards Organization* (Organización Internacional de Normas) tiene la finalidad de crear una normativa común basada en las normas utilizadas en muchos países y que cubren una gran variedad de temas. La norma ISO 9000 de 1994 fue actualizada en el año 2000 bajo el nombre de ISO 9000-2000. La norma europea EN ISO 9000 de diciembre de 2000 la adopta íntegramente, así como la española UNE-EN ISO 9000.

La norma editada el año 1994 constaba de las partes:

- ISO 9000 - *Generalidades*.
- ISO 9001 - *Proyecto, fabricación, instalación y servicios*.
- ISO 9002 - *Producción e instalación*.
- ISO 9003 - *Inspección y ensayo final del producto*.
- ISO 9004 - *Sistemas de dirección de la calidad*.

Y se orientaba al aseguramiento de la calidad (procedimientos documentales).

En la nueva norma ISO 9000:2000 desaparece la idea de predeterminado y sistemático, cambiando la exigencia de procedimientos documentados por la de procesos adecuados (con o sin procedimiento documental), siendo uno de sus objetivos principales el aumento de la satisfacción del cliente. El número de estándares queda reducido a:

- ISO 9000 - *Fundamentos de la gestión de la calidad y terminología*.
- ISO 9001 - *Requisitos del proyecto, fabricación, instalación y servicios de productos.*
- ISO 9004 - *Sistemas de dirección y organización de la calidad*.

- ISO 19011 - *Auditorias de gestión de calidad y gestión ambiental*.

Los requisitos del cliente son productos con características que satisfacen las necesidades y expectativas del cliente y que se expresan en la especificación del producto. La realización del producto y las mediciones para garantizar su calidad corresponden a la empresa atendiendo a las variables críticas del proceso de fabricación.

Este comportamiento de la empresa conduce a una satisfacción del cliente y ello repercute en un análisis y mejora del proceso de producción en la forma vista en la figura 10.22 del modelo de gestión de calidad (ISO 10012).

La norma ISO 10012 establece el sistema de gestión de las medidas metrológicas.

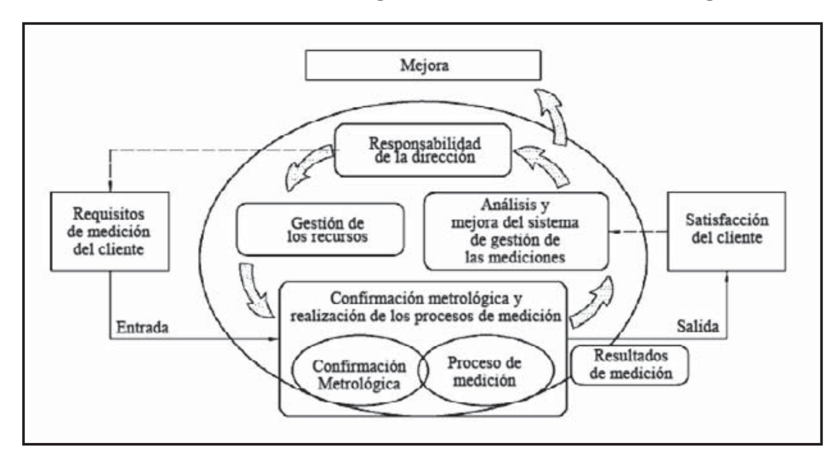


Figura 10.22 *Gestión de las medidas según ISO 10012*

Desde el punto de vista de calibración de los instrumentos, la norma más importante es la ISO 9001 de la que se cita una información adicional resumida.

10.8.1 ISO 9001

Los requisitos que se establecen en esta norma tienen como objetivo fundamental evitar productos no conformes en todas las etapas, desde el proyecto del producto hasta el final de su vida útil o, si estos se producen, detectarlos antes de su instalación y tomar las medidas correctivas oportunas. Estas medidas pueden contener una inspección final y los ensayos correspondientes.

La norma describe los 20 apartados que una compañía debe implementar para lograr unos resultados económicos satisfactorios, y es, además, una base excelente para realizar esfuerzos de mejora continuos con vistas a la satisfacción del cliente.

En general, el sector industrial cumple la norma ISO 9000 de 1994, por lo que se recomienda que aporte un plan estratégico de requerimientos adicionales y criterios de nivel correcto de cumplimiento.

Con relación al apartado de "*Equipos de inspección, medida y ensayo*", el sistema de calidad ISO 9001 establece que el suministrador de un producto debe aportar una confirmación metrológica (conjunto de operaciones necesarias para asegurar que el equipo de medición cumple con los requisitos para a su previsto uso).

Es decir:

- Identificar, calibrar y ajustar todo el equipo de inspección, medida y ensayo que puede afectar a la calidad del producto, a intervalos definidos con relación a equipos de calibración certificados por un organismo reconocido.
- Establecer, documentar y mantener los procedimientos de calibración de los instrumentos y de los equipos de calibración.
- Asegurar que las condiciones ambientales son adecuadas para las operaciones de calibración, inspección, medida y ensayos que se efectúen en los instrumentos.

Asimismo, la empresa debe establecer una función metrológica, es decir, una función con responsabilidad en la organización para definir e implementar el sistema de control de las mediciones. La implantación de la norma ISO 9002 presupone la redacción de manuales de calibración de los instrumentos afectados (clave en la obtención de la calidad esperada del producto fabricado por la empresa), la creación de procedimientos documentados para la calibración y la conformidad o no-conformidad de los instrumentos y equipos de calibración, el entrenamiento del personal destinado a la calibración ISO 9001 y la creación de un área separada dentro del taller de instrumentos donde se encontrarán ubicados los equipos y herramientas de calibración.

El período de calibración de cada instrumento es fijado por la propia empresa, de acuerdo con la experiencia que posea sobre el trabajo en la planta. Normalmente suele ser de un año para los aparatos normales.

A señalar que existen en el mercado calibradores compactos controlados por microprocesador para la calibración de presión, temperatura, frecuencia y otras variables de proceso, que, ligados con un PC, automatizan el proceso de calibración permitiendo almacenar en CD o en *pendrive* y registrar en impresora los datos de los instrumentos calibrados. Las compañías que suministran estas herramientas indican que constituyen el sistema ideal de calibración para cumplir con la norma ISO 9000, y de hecho lo son, puesto que alcanzan una exactitud del orden del ± 0,05%.

En la figura 10.23 puede verse un ejemplo de metodología a seguir en el control de los equipos de inspección, medición y ensayo.

La *certificación ISO 9000* es un trámite al que pueden aspirar aquellas empresas que hayan establecido un sistema de aseguramiento de la calidad y que quieran ser certificadas por una entidad de carácter independiente, que pueda determinar, mediante auditoria, la adecuación al sistema y su mantenibilidad de acuerdo con los criterios de alguna de las normas ISO que se aplique y que sean de carácter contractual.

En una concesión de certificación por parte de un organismo de certificación, como AENOR por ejemplo, hay un compromiso, por parte de la empresa adjudicataria, de mantener el sistema de acuerdo con los principios y procedimientos establecidos en los distintos manuales, y otro compromiso por parte del organismo de certificación, de independencia, objetividad y comprobación de desviaciones cada vez que se produzcan o que pueda sospecharse tal desviación y que no haya sido informada preceptivamente.

La marca "ER" (Empresa Registrada), concedida por AENOR, tiene una validez de tres años y debe realizarse, a su expiración, otra auditoria de renovación de la certificación.

Asimismo, cada año se realiza una auditoria de comprobación del mantenimiento del sistema de calidad.

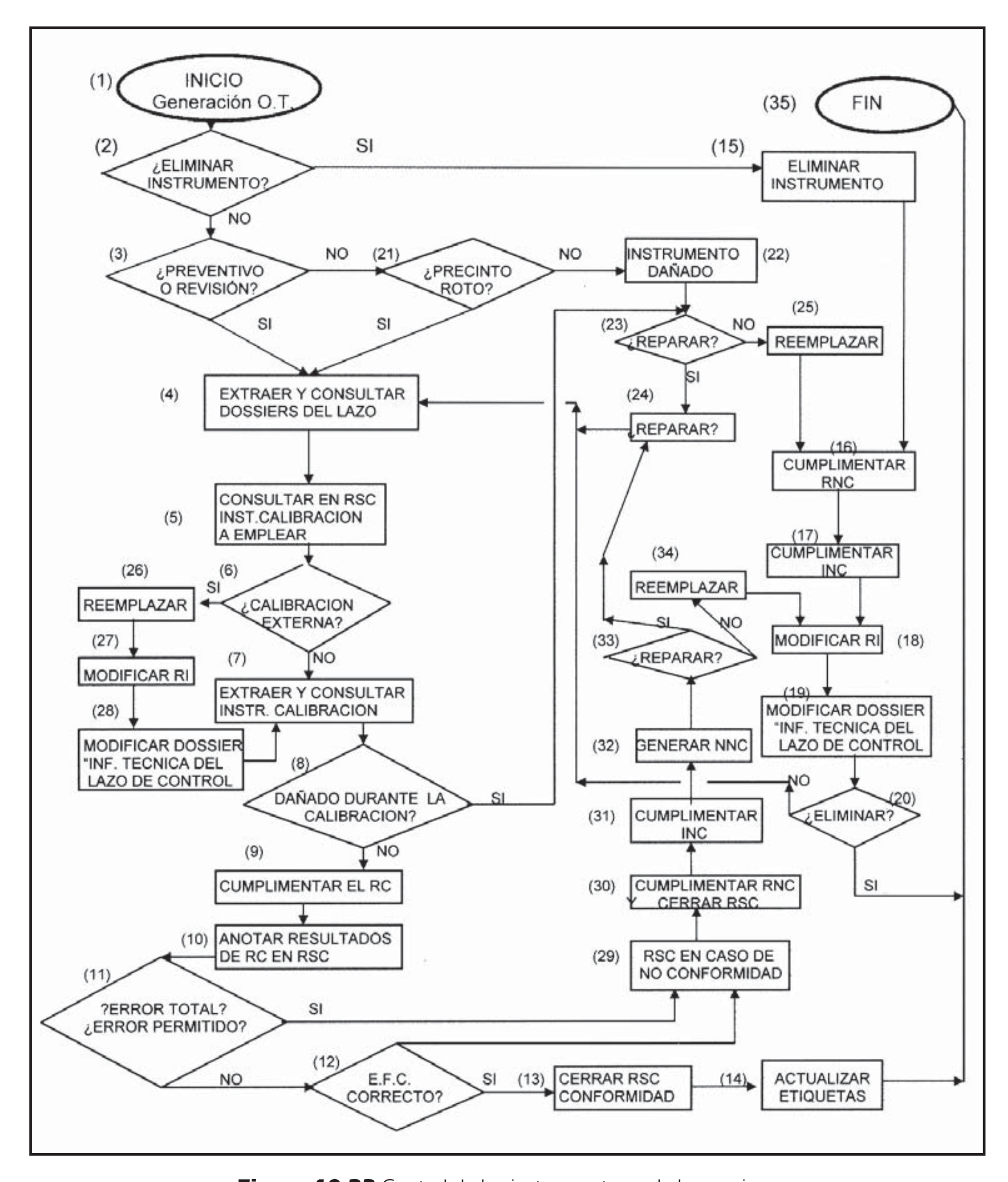


Figura 10.23 Control de los instrumentos y de los equipos

Aparentemente, la implantación de la norma ISO 9002 parece sencilla, pero no es una tarea fácil. Es necesario que el equipo de calibración esté certificado por un organismo reconocido, que dicho equipo se calibre periódicamente así como los instrumentos de medición y control afectados, que se identifiquen perfectamente los instrumentos, se entrene al personal y que todo ello esté perfectamente documentado. Supone una mentalidad totalmente nueva dentro de la empresa, englobando a todos sus departamentos y personal y contando con su convencimiento y con su aportación individual. Si no es así, será difícil conseguir una implantación adecuada.



Capítulo 11
Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control

11.1 Generalidades

Este capítulo tiene por objeto presentar al lector varias aplicaciones típicas en la industria. Hacer este estudio de forma exhaustiva requeriría una obra aparte ya que no existe, prácticamente, límite en las aplicaciones de los instrumentos en los procesos industriales.

Este capítulo se ha limitado, pues, a estudiar algunas de las operaciones de proceso que se utilizan con mayor frecuencia:

- Calderas de vapor.
- Secaderos y evaporadores.
- Hornos de empuje.
- Columnas de destilación.
- Intercambiadores de calor.

11.2 Calderas de vapor

11.2.1 Generalidades

Las calderas de vapor se utilizan en la mayoría de industrias debido a que muchos procesos emplean grandes cantidades de vapor.

La caldera se caracteriza por una capacidad nominal de producción de vapor, en toneladas/hora, a una presión especificada y con una capacidad adicional de caudal en puntas de consumo de la fábrica.

A la caldera se le exige, pues, mantener una presión de trabajo constante para la gran diversidad de caudales de consumo en la factoría, por lo cual debe ser capaz de:

a) Aportar una energía calorífica suficiente en la combustión del fuel-oil o del gas con el aire.
b) Desde el punto de vista de seguridad, el nivel debe estar controlado y mantenido dentro de unos límites.
c) Es necesario garantizar una llama segura en la combustión.
d) El sistema de control debe ser seguro en la puesta en marcha, en la operación y en el paro de la caldera.
e) El funcionamiento de la caldera debe ser optimizado para lograr una rentabilidad y economía adecuadas, lo cual es posible con un control digital y/o distribuido que permite optimizar la combustión (ahorros del 2% al 10% en combustible) y ganar en seguridad.

11.2.2 Control de combustión

La regulación de la combustión se basa en mantener constante la presión de vapor en la caldera, tomándose sus variaciones como una medida de la diferencia entre el calor tomado de la caldera como vapor y el calor suministrado.

El controlador de la presión de vapor ajusta la válvula de control de combustible. La señal procedente del caudal de aire es modificada por un relé de relación para ajustar la relación entre el aire y el combustible, y pasa a un controlador que la compara con la señal de caudal de combustible. Si la proporción no es correcta, se emite una señal al servomotor de mando del ventilador o a la válvula de mariposa, de modo que el caudal de aire es ajustado hasta que es correcta la relación combustible-aire.

En la regulación de la combustión puede darse preferencia, en el mando, al combustible o al aire para que la operación de la caldera corresponda a un sistema determinado de variadas características de seguridad. Estas características de combustión son las siguientes:

- Caudal fuel - caudal aire en serie.
- Caudal aire - caudal fuel en serie.
- Presión de vapor - caudal fuel/caudal vapor - caudal aire en serie.
- Caudal aire - caudal fuel en paralelo.

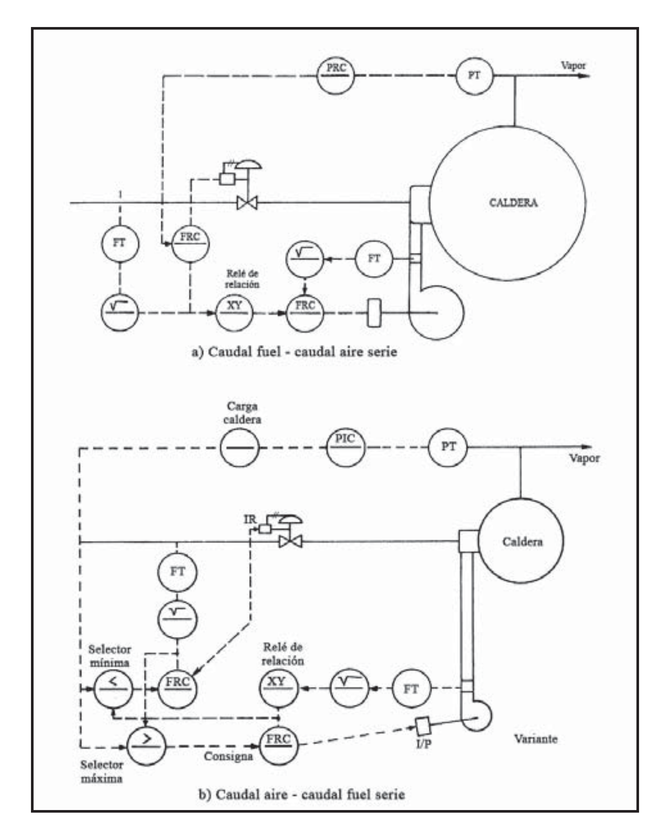


Figura 11.1 Control de combustión

Caudal fuel - caudal aire en serie

En el primer esquema de funcionamiento que puede verse en la figura 11.1a, el controlador de presión (*master*) ajusta el punto de consigna del controlador de caudal de fuel y esta variable actúa, a través del relé de relación fuel-aire, como punto de consigna del controlador de aire. Como las variaciones del caudal de fuel influyen lentamente en la señal de presión de vapor, el controlador "maestro" se ajusta para una respuesta rápida ante cambios en la presión. En esta disposición, si varía la presión del vapor, el caudal de fuel cambia antes que el del aire de combustión. Si se limita el caudal de fuel, lógicamente, también quedará limitado el caudal de aire.

La desventaja principal del sistema es el riesgo de explosión que se presenta ante un fallo de aire en el punto de consigna del controlador de caudal de aire; si así ocurre, no hay aire de combustión, pero el fuel continua circulando, acumulándose.

Caudal aire - caudal fuel en serie

Tal como puede verse en la figura 11.1b, aquí el controlador de presión (*master*) ajusta la señal de aire, el cual ajusta a través del relé de relación el controlador de fuel. El sistema es más seguro que el anterior ya que elimina la posibilidad de formación de una mezcla explosiva cuando falla la señal de aire de combustión.

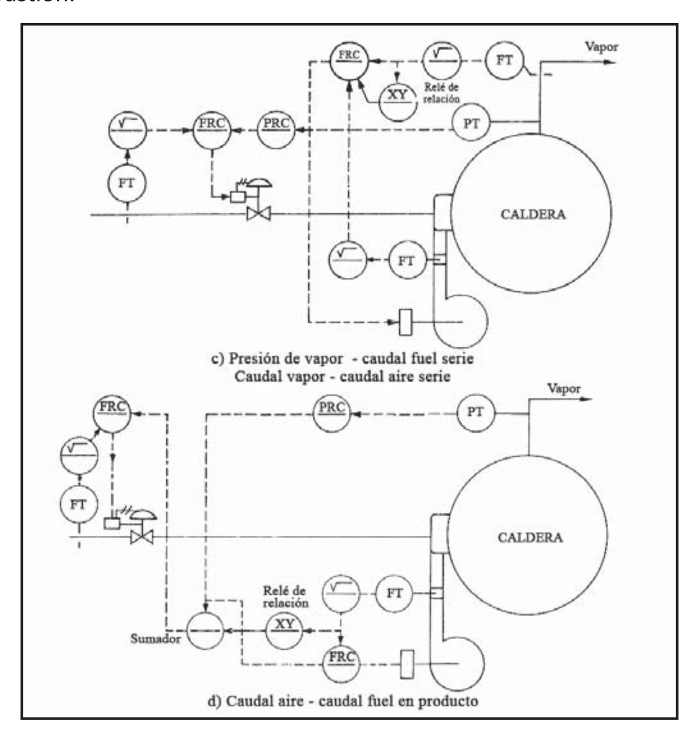


Figura 11.1 Control de combustión

Una variante de este sistema consiste en utilizar un controlador de carga de la caldera a la salida del "maestro" de presión (común a varias calderas). La salida del controlador de carga es dirigida a dos selectores de máxima y de mínima, lo que permite: ante un aumento de la demanda de vapor la señal pasa al controlador de aire, sin que el fuel o el gas aumente hasta que no lo ha hecho el aire.

Si la demanda de vapor disminuye, el fuel disminuye primero y luego lo hace el aire; y si la señal de aire falla, el caudal de fuel-oil baja a cero automáticamente.

Presión de vapor - caudal fuel en serie/caudal vapor - caudal aire en serie

El sistema representado en la figura 11.1c se caracteriza por mantener, con más seguridad, la relación correcta aire-fuel aunque el fuel no sea medido correctamente. El controlador de presión de vapor ajusta el controlador de caudal de fuel. El transmisor de caudal de vapor ajusta el controlador de caudal de aire al sistema de control de combustión. Aunque las variaciones de caudal de vapor sean rápidas, las fluctuaciones que experimenta no lo son tanto como la presión de la línea de vapor principal. Este sistema se emplea con preferencia en calderas de carbón pulverizado.

Caudal aire - caudal fuel en paralelo

La ventaja principal de este sistema, que puede verse en la figura 11.1d, es su control directo en el fuel y en el aire. De hecho, para mantener una relación correcta fuel-aire conviene incorporar un relé de relación manual al sistema. El sistema tiene un mayor rendimiento que el sistema en serie pero está limitado a calderas con pequeños cambios de carga.

Sistema cruzado de adelanto - retardo (lead-lag)

Es parecido al sistema paralelo pero incorpora un enclavamiento entre el fuel y el aire, de tal manera que el caudal de fuel sigue al caudal de aire si aumenta la carga y, si la carga disminuye, es el caudal de aire el que sigue al caudal de fuel. Tiene la ventaja de que previene la condición de peligro de exceso de fuel.

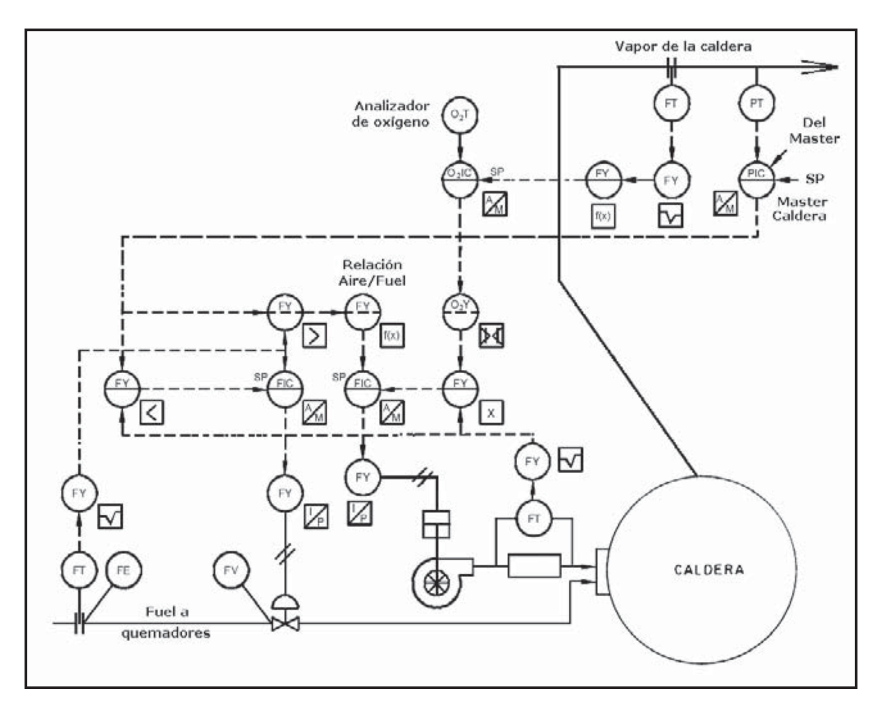


Figura 11.1 Sistema cruzado de adelanto-retardo entre el fuel y el combustible con analizador de oxígeno

Este sistema se recomienda cuando los cambios de carga son oscilantes y dinámicos y permite un control preciso de la relación fuel/aire (figura 11.1e).

11.2.3 Control de nivel

La regulación del agua de alimentación que establece el nivel de la caldera depende de múltiples factores, del tipo de caldera, de la carga, del tipo de bomba y del control de presión del agua de alimentación.

Tipo	Variables	Capacidad Kg/h	Capacidad Kg/h	Capacidad Kg/h
		< 6.000	6.000 – 15.000	> 15.000
Un elemento	Nivel	Cargas irregulares	Pequeños cambios de carga	Cargas mantenidas
Dos elementos	Nivel Caudal de vapor	Cargas irregulares con grandes fluctuaciones	Cambios de carga moderados	Lentos cambios de carga moderados
Tres elementos	Nivel Caudal de vapor Caudal agua			>20.000

Tabla 11.1 Sistemas de control de nivel

El sistema de control del agua de alimentación puede realizarse de acuerdo con la capacidad de producción de la caldera, según la tabla 11.1 y que el lector debe tomar sólo como guía de selección, teniendo presente que cada caso individual debe estudiarse separadamente.

En calderas de pequeña capacidad, inferior a 1000 kg/h, la regulación puede ser todo-nada, con dos alarmas de nivel alto y bajo que ponen en marcha la bomba de alimentación del agua (figura 11.2a).

En calderas de capacidad media, del orden de 2000-4000 kg/h, puede utilizarse un controlador de flotador con un reóstato acoplado eléctricamente a una válvula motorizada eléctrica. Este conjunto (figura 11.2b) actúa como un control proporcional con punto de consigna el punto medio del campo de medida del nivel de flotador.

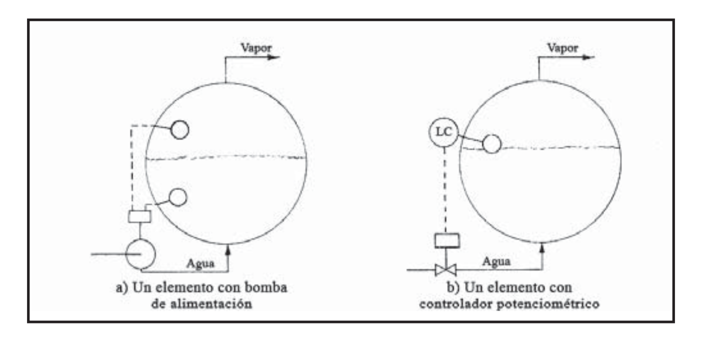


Figura 11.2 Control de nivel

En la regulación de nivel de un elemento, representada en la figura 11.2c, el único instrumento utilizado es el controlador de nivel que actúa sobre la válvula del agua de alimentación. El instrumento medidor de nivel puede ser del tipo desplazamiento o de presión diferencial de diafragma.

La regulación de nivel de dos elementos se logra con un controlador de caudal de vapor y un controlador de nivel, cuyas señales de salida se comparan en un relé de relación que actúa directamente sobre la válvula de control del agua de alimentación. En la figura 11.2d puede verse este sistema de control. De acuerdo con la demanda de caudal de vapor, hay una aportación inmediata de agua de alimentación a través del controlador secundario de nivel. Este último, sólo es utilizado como reajuste de las variaciones que pueden producirse con el tiempo en el nivel de la caldera.

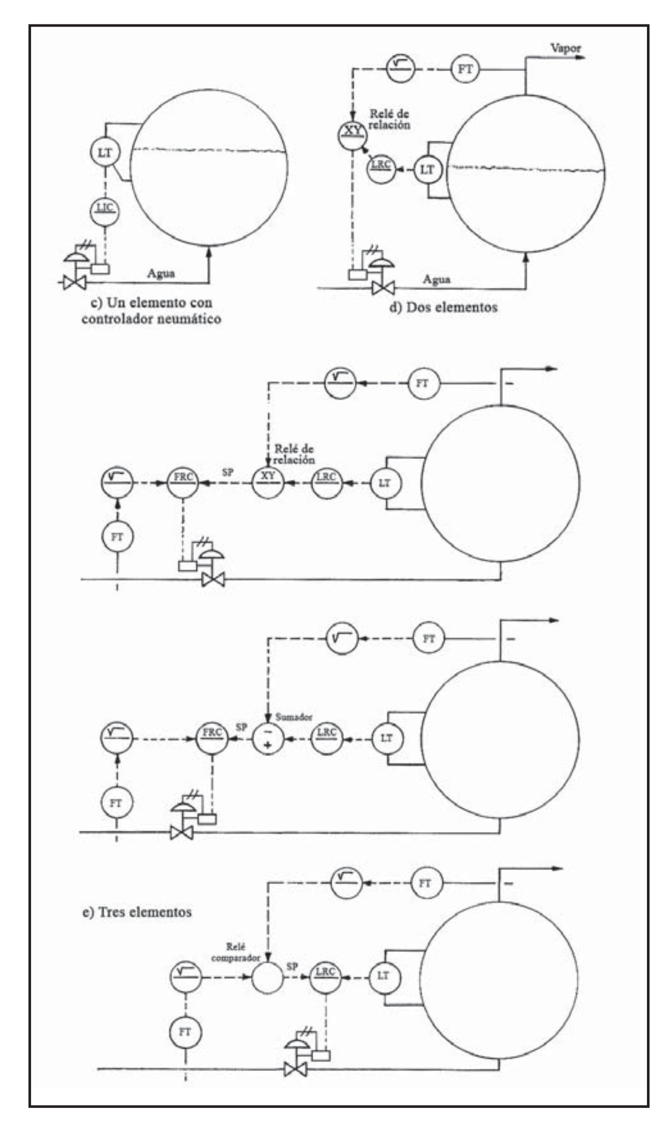


Figura 11.2 Control de nivel

La regulación de tres elementos elimina el fenómeno de oscilación del nivel de agua que se produce cuando el caudal de vapor crece o disminuye rápidamente. Es un sistema recomendado en plantas con cargas dinámicas.

Cuando el caudal de vapor aumenta bruscamente, la presión baja, con lo que se produce una vaporización rápida que fuerza la producción de burbujas y agua, lo que da lugar al aumento aparente del nivel de la caldera. La oscilación es opuesta a la demanda y el fenómeno es importante en calderas de cierta potencia y volumen reducido, sujetas a variaciones de caudal frecuentes y rápidas.

Las tres variables que intervienen en el sistema son:

- Caudal de vapor.
- Caudal de alimentación de agua.
- Nivel de agua.

Para que las condiciones de funcionamiento sean estables, el caudal de vapor y el de agua deben ser iguales y, de forma secundaria, el nivel de agua debe reajustarse periódicamente para que se mantenga dentro de unos límites determinados (normalmente son de unos 50 mm por encima y por debajo de la línea central de la caldera). Manteniendo estas funciones en las tres variables, los instrumentos correspondientes pueden estar relacionados entre sí de varias formas. Las más representativas se encuentran en la figura 11.2e en las que una señal anticipativa (*feedforward*) del caudal de vapor se superpone al control de nivel, y todas tienen por objeto dar prioridad a las diferencias entre los caudales de agua y de vapor frente a las variaciones del nivel que pueden producirse ante una demanda súbita, es decir, en estas condiciones el sistema de control actúa obedeciendo a la diferencia relativa de caudales con preferencia a los cambios en el nivel.

Señalemos que la medida del caudal de vapor se efectúa preferentemente con una tobera porque su forma suave evita la erosión que, de otra forma, se produciría en una placa-orificio por causa de las gotas de agua que inevitablemente arrastra el vapor. El caudal de agua de alimentación puede medirse a través de una placa-orificio o de una tobera.

11.2.4 Seguridad de llama

En el capítulo 7 se han descrito los distintos sistemas de seguridad de llama que se emplean en la industria.

Exceptuando las calderas de muy pequeña capacidad, el elemento detector utilizado universalmente es el ultravioleta por la gran seguridad que ofrece. El relé de llama conectado al detector puede adoptar muchas formas, desde la más sencilla alarma y paro de la caldera hasta realizar funciones de:

- Prebarrido, es decir, limpieza de los gases que pueden haberse acumulado desde la última combustión.
- Encendido de la llama piloto.
- Encendido de la llama principal.
- Paro de la instalación según un enclavamiento secuencial en el que intervienen los elementos: fallo de llama, presostato de baja presión de fuel o gas, alarma de nivel de la caldera, etc.
- Postbarrido, fase en la que se limpian los gases quemados.

El circuito de llama (detector + relé) dispone además de una comprobación de su propio circuito en el arranque de la caldera, lo cual es suficiente en las industrias que paran una vez a la semana. Si el proceso es continuo, y la caldera debe trabajar sin paros durante períodos prolongados, aumenta el riesgo de coincidencia entre el fallo del sistema de seguridad y la presencia de grandes

cantidades de combustible sin quemar. Se recomienda utilizar un detector ultravioleta que permite autocomprobar, cada segundo, el circuito electrónico del sistema de llama. Se consigue mediante una placa que corta periódicamente la radiación de la llama hacia el detector, momento en el cual se autocomprueba el circuito. Cualquier fallo detectado hace parar la instalación.

11.3 Secaderos y evaporadores

Los secaderos tienen por objeto obtener el producto sólido con poca humedad, mientras que los evaporadores concentran el producto en forma líquida al evaporar el agua.

Entre los diversos modelos de secaderos se encuentra el secadero continuo de evaporación rápida (*flash*) que transporta el producto en una corriente de aire caliente y, en muy poco tiempo, disminuye su humedad hasta el valor final. Como es difícil medir directamente la humedad del producto de forma continua se controla, en su lugar, la temperatura variable que depende indirectamente de la humedad. En la figura 11.3 se encuentra un esquema de este secadero con los instrumentos de control correspondientes. El producto, en forma de polvo húmedo, entra en el circuito después del horno y se seca durante el recorrido por el tubo vertical.

El control suele ser en cascada, siendo la variable primaria la temperatura de salida y la variable secundaria la temperatura después del horno. El control es, normalmente, *PID*.

El quemador del horno tiene controles auxiliares, tales como vigilancia de llama, válvula autorreguladora de presión para inyectar vapor al fuel-oil y pulverizarlo, válvula de solenoide con rearme manual para cerrar el paso del combustible, presostatos y termostatos para alarma de máxima y mínima presión y de temperatura. El conjunto forma parte del circuito de enclavamiento de la instalación.

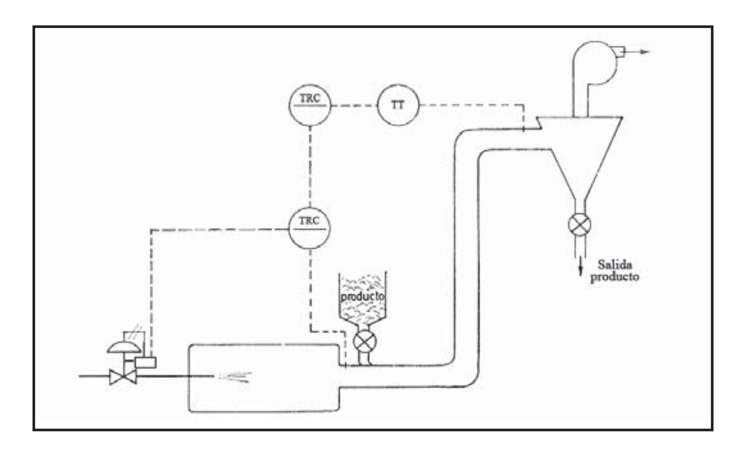


Figura 11.3 Secadero de evaporación rápida

Otro tipo de secador es el rotativo, que consiste en un cilindro de gran longitud en cuya entrada se introduce el producto húmedo y, a cuyo través, circula aire caliente. En la figura 11.4 puede verse un esquema del control del proceso observándose que, análogamente al secadero de evaporación rápida, el control suele ser en cascada *PID*.

Otro tipo de secador es el de doble cilindro rotativo, representado en la figura 11.5, que fue uno de los primeros sistemas que se empleó para secar.

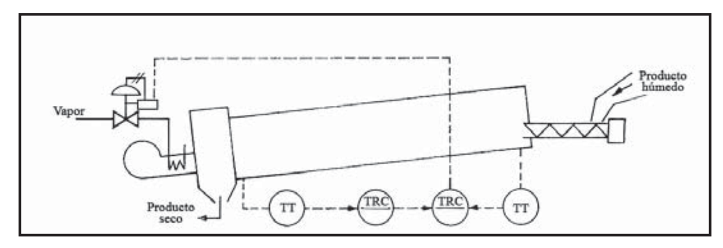


Figura 11.4 Secadero rotativo

Consiste en dos cilindros rotativos, calentados con vapor, que giran en sentidos opuestos hacia adentro muy poco separados y arrastrando una película del producto. Los cilindros se cargan con producto que se seca en el corto espacio existente en el rodillo hasta una cuchilla que lo arranca y cae en un transportador.

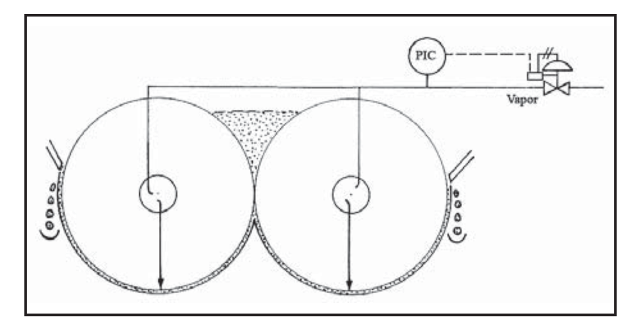


Figura 11.5 Doble cilindro rotativo

El único control automático que se aplica es la regulación de presión de vapor. Los evaporadores existen en muchos tamaños, formas y tipos. El evaporador discontinuo es de producción forzosamente limitada por la necesidad de las operaciones de llenado y de vaciado.

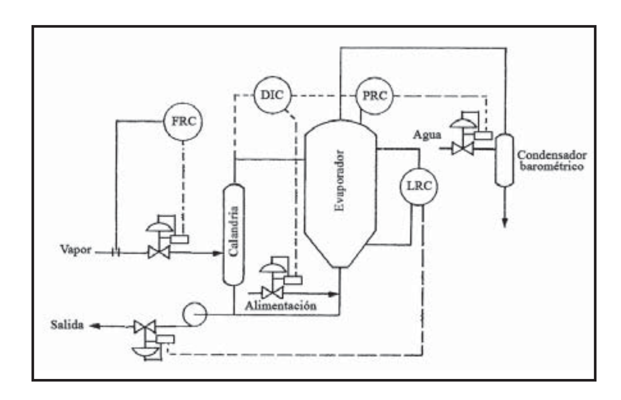


Figura 11.6 Evaporador de simple efecto

En cambio, el evaporador continuo tiene una producción más regular. Según el número de veces que la solución es calentada por la fuente de calor se tienen varios tipos: evaporador de simple efecto, de doble efecto y de triple efecto e, incluso, de más efectos, si bien los más comunes son los dos últimos.

En la figura 11.6 se representa un evaporador de un solo efecto. Se establece un caudal fijo de vapor a la calandria, se controla el nivel del evaporador variando la entrada del producto y se regula la concentración midiendo la elevación del punto de ebullición, es decir, la diferencia de temperaturas entre el líquido en ebullición en el evaporador y el condensado a la misma presión absoluta, y actuando sobre la salida del producto. Otras formas de medir la concentración están basadas en la conductividad, en la presión diferencial y en la radiación gamma, pero, excepto este último, tienen el problema de la posible obturación del elemento. Se controla, asimismo, la presión absoluta en el cuerpo del evaporador, actuando sobre la entrada de aire o bien sobre la entrada del agua que va al condensador barométrico, caso de utilizar este sistema para generar el vacío.

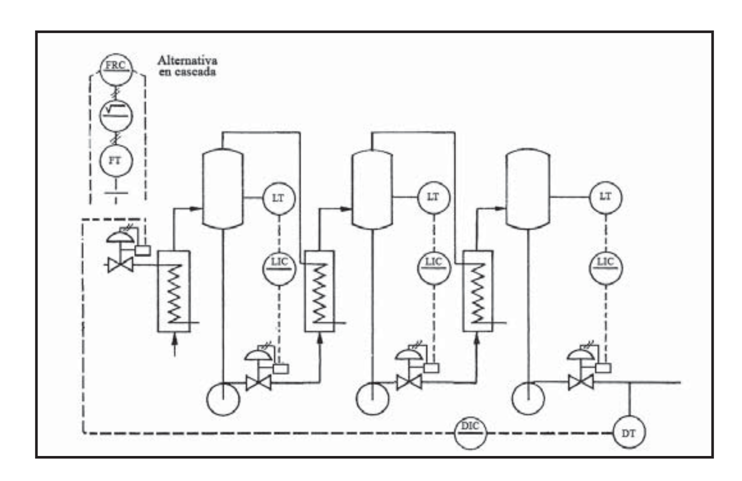


Figura 11.7 Evaporador de triple efecto

En la figura 11.7 puede verse la regulación de un triple efecto. Excepto el primer efecto, los otros dos se calientan con el vapor del producto generado en el efecto anterior. Debido a su gran capacidad y a la lentitud con que se establecen nuevas condiciones en el proceso, el sistema de control se escoge de modo que se mantengan condiciones fijas y se disminuyan al mínimo los efectos de cambios de carga exteriores al proceso. Los instrumentos de control son similares a los del evaporador de un solo efecto.

11.4 Horno túnel

Los instrumentos de regulación y control forman parte integral de los equipos de proceso de la industria cerámica y, en particular, constituyen una necesidad en el proceso de cocción de los productos cerámicos realizado en un horno túnel.

Los procesos de cocción del bizcocho y del bizcocho recubierto de esmalte se basan en el mantenimiento de una curva de cocción que establece un programa preciso de temperatura distribuida, de acuerdo con las tres zonas típicas del horno: precalentamiento, cocción y enfriamiento (figura 11.8). La carga es transportada, en vagonetas, a una velocidad determinada y las temperaturas se regulan básicamente en la zona de cocción donde se encuentran situados los quemadores de combustible, y los valores deseados en la zona de precalentamiento se alcanzan mediante la circulación de aire caliente procedente de la zona de enfriamiento.

Estas temperaturas corresponden a las zonas del horno, ya que salvo casos muy especiales, es difícil medir directamente la temperatura de las piezas. De todos modos, debido al tiempo que las piezas pasan dentro del horno puede admitirse que en la última zona, donde no absorben prácticamente calorías, su temperatura es muy próxima a la de las paredes.

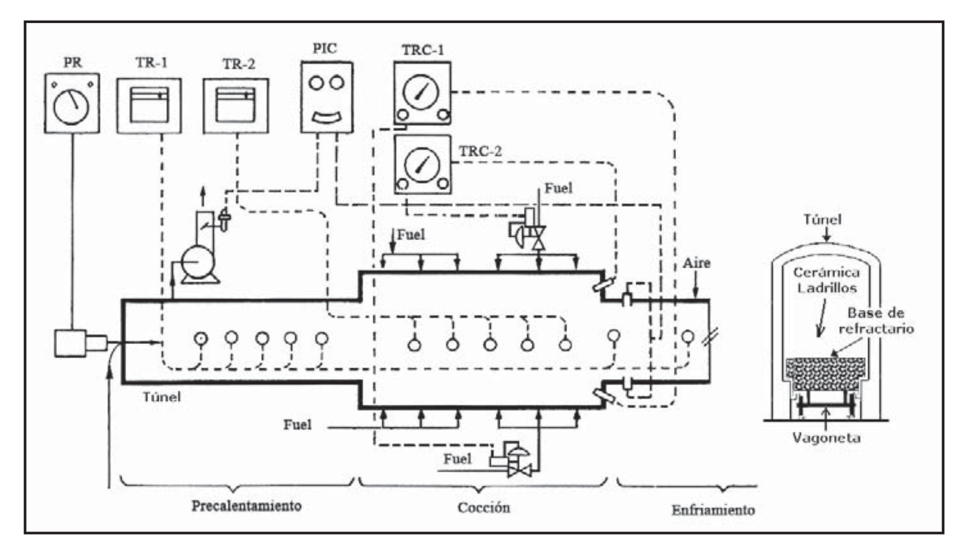


Figura 11.8 *Esquema de la regulación de un horno túnel típico*

La medida de la temperatura se efectúa con termopares de cromel-alumel o de platino platino-rodio, según sean las temperaturas alcanzadas y con fundas cerámicas de mullita sílice-alumínica o de aluminio recristalizado (nótese que las temperaturas máximas de trabajo de los termopares de cromel-alumel y platino-platino-rodio son de 950-1200 °C y de 1.400 °C, respectivamente).

Los reguladores actúan, o bien, sobre una válvula de solenoide, o bien, sobre válvulas neumáticas dotadas de servomotor electroneumático o digitoneumático.

La zona de cocción puede dividirse en varias zonas de control y cada una suele estar regulada independientemente por un regulador todo-nada, flotante o bien por un regulador *P*, *PI* o *PID*.

En el horno túnel, también es importante la regulación del tiro, al mantener una distribución uniforme de temperaturas en cada sección del horno. Las dos tomas del controlador de tiro se conectan en lados opuestos en la entrada o salida de la zona de encendido que es la posición que usualmente da los mejores resultados. El controlador actúa sobre el ventilador de salida del aire, manteniendo así el tiro deseado.

11.5 Columnas de destilación

La operación de destilación consiste en separar una mezcla por diferencia de composición entre un líquido y su vapor. Esta operación se realiza de forma continua en las denominadas columnas o torres de destilación, donde, por un lado, asciende el vapor del líquido hasta salir por la cabeza de la columna y, por el otro, va descendiendo el líquido hasta llegar a la base. En estos pasos tiene lugar una mezcla entre las dos fases, de tal modo que pueden efectuarse extracciones a distintos niveles de la columna para obtener productos más o menos pesados.

Los problemas de la destilación son muy diversos, por lo cual, los tipos de columnas también lo son. Estudiaremos una columna típica de funcionamiento continuo que está representada en la figura 11.9.

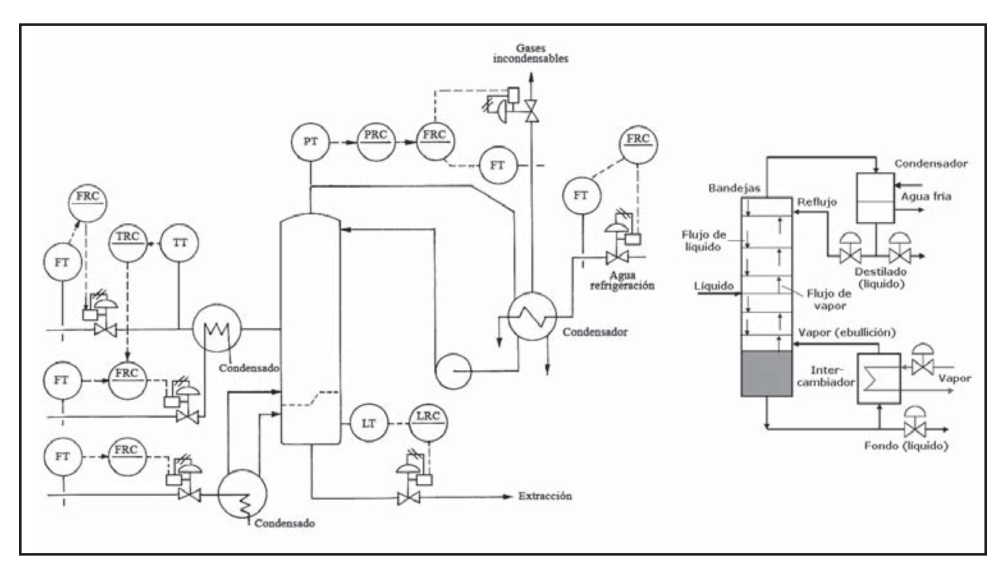


Figura 11.9 *Columna de destilación*

Las variables importantes que regulan el funcionamiento de la columna son la presión en la cabeza de la columna, el caudal, la composición y la temperatura de la alimentación, el calor añadido y las calorías extraídas, los caudales de destilado y de producto extraídos en la base.

La presión en la columna se regula mediante un controlador de presión en cascada con un controlador de caudal de los gases incondensables que escapan del condensador, si bien también podría efectuarse con el regulador de presión actuando directamente sobre la válvula de gases incondensables.

El caudal de la alimentación se regula con un controlador de caudal que mantiene un caudal constante, gracias a una alta ganancia (banda proporcional bastante estrecha).

La composición de la alimentación tiene una gran importancia en el funcionamiento de la columna. Sin embargo, es difícil ajustar esta composición, de modo que es necesario actuar sobre la columna cuando se presentan cambios en la composición de la alimentación. Entre los analizadores, el cromatógrafo es el más utilizado.

La temperatura de la alimentación es también importante. Al objeto de controlarla se emplea un intercambiador de calor con vapor. La temperatura se regula en cascada con el caudal del vapor.

El calor añadido en la columna se efectúa a través de un intercambiador de calor instalado en la base o en un plato intermedio de la columna. Un controlador de caudal de vapor ajusta estas calorías aportadas. Como complemento, se instala un controlador de nivel en la base de la columna que lo ajusta mediante una válvula de control que actúa sobre la extracción.

Las calorías extraídas tienen lugar en el condensador de los gases que salen de la cabeza de la columna. Un controlador de caudal de agua de refrigeración del condensador ajusta estas calorías.

El caudal de destilado se ajusta mediante un controlador de nivel del condensador, en cascada con un controlador de caudal en la extracción.

El caudal de producto extraído en la base está relacionado con el calor añadido en la columna y tal como se ha indicado, está regulado indirectamente por el controlador de nivel de la base de la columna. Es obvio que las variables que influyen en el funcionamiento de la columna de destilación son muy diversas y que cada una de ellas, si varía, actúa como una perturbación en todo el proceso, por lo cual existen formas variadas de control entre las que cabe citar el control por ordenador.

11.6 Intercambiadores de calor

La gran mayoría de los procesos industriales emplean intercambiadores de calor en operaciones tales como precalentamiento, pasteurización, esterilización y refrigeración, entre otras.

Existen varios sistemas para el control de los intercambiadores de calor debido a que son muchos los factores que deben considerarse: la presión del vapor o del fluido de alimentación, las fluctuaciones en el caudal del producto, las variaciones en la temperatura del producto, en su calor específico, los retardos del proceso, etc.

En la figura 11.10a puede verse un esquema de control simple con un controlador de temperatura que actúa directamente sobre la válvula de vapor.

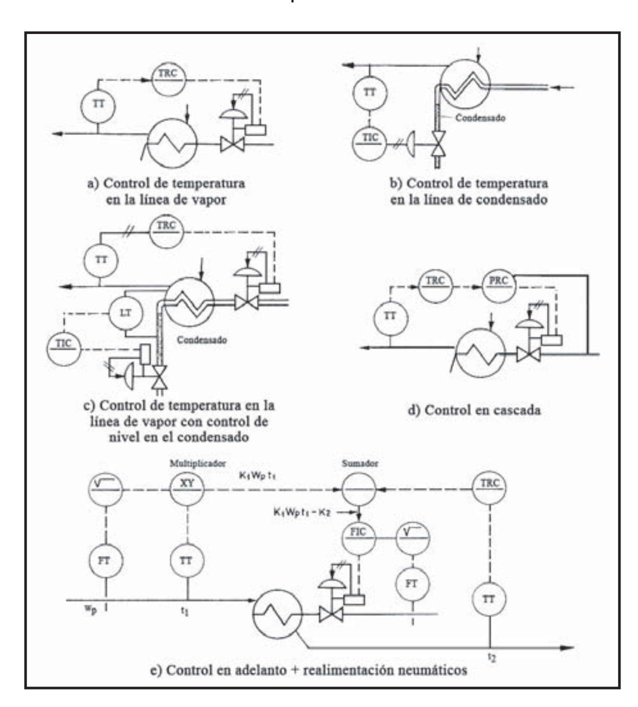


Figura 11.10 Intercambiadores de calor de vapor

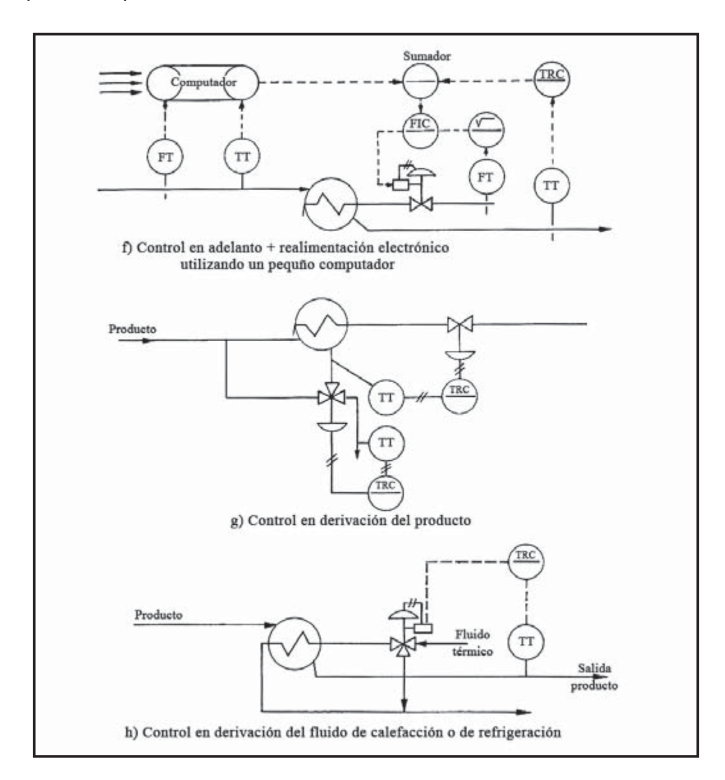
En otro sistema (figura 11.10b) se regula la extracción de condensado, es decir, indirectamente el nivel de condensado en el serpentín de vapor, mediante un controlador de temperatura del producto que manda una válvula de control en la línea de salida del condensado. Como ventajas, el sistema ofrece, con relación al anterior, la eliminación de los problemas de purga del condensado al mantenerse constante la presión de vapor dentro del serpentín y el empleo de una válvula de control más pequeña.

Sin embargo, el control óptimo de temperatura deja mucho que desear ya que si disminuye el caudal del producto, el controlador de temperatura manda cerrar la válvula y el serpentín tarda cierto tiempo en llenarse del condensado del vapor, con el resultado de una considerable lentitud en la respuesta del sistema para acomodarse a las nuevas condiciones. En cambio, lo contrario, es decir, el aumento del caudal del producto tiene una respuesta rápida ya que, al abrirse la válvula de control, el serpentín se vacía rápidamente.

Una variante del sistema anterior, que se aplica cuando la presión del condensado es baja y existen problemas en su eliminación, es la sustitución del purgador clásico del condensado por un control de nivel del condensado (figura 11.10c).

La temperatura del producto continúa siendo regulada por un controlador convencional actuando sobre la válvula de vapor.

Otro sistema es el control en cascada (figura 11.10d) entre el controlador de temperatura, como primario, y un controlador de presión de vapor, como secundario. De este modo, las variaciones de presión del vapor de la línea de alimentación son corregidas, inmediatamente, por el controlador de presión secundario y el controlador de temperatura primario se encarga de compensar las variaciones de temperatura por otras causas.



f) Control en adelanto + realimentación electrónico utilizando un pequño computador

g) Control en derivación del producto

h) Control en derivación del fluido de calefacción o de refrigeración

Figura 11.10 Intercambiadores de calor de vapor

El control anticipativo (*feedforward*), combinado con el control clásico de realimentación, también puede aplicarse a un intercambiador de calor, en particular, cuando su operación es crítica y se necesita un control estable con una recuperación rápida ante las perturbaciones, que compense el

coste elevado de la instrumentación implicada. Idealmente, la ecuación que debe resolver continuamente el control en adelanto es:

$$W_v \times q_v = W_p c_e \times (t_2 - t_1)$$

en la que:

W_v = caudal del vapor en peso (kg/h)

q_v = calor de condensación del vapor

W_p = caudal del producto en peso (kg/h)

c_e = calor específico del producto

$t_1,\ t_2$ = temperaturas del producto a la entrada y a la salida, respectivamente, prescindiendo del rendimiento del intercambiador

Esta ecuación puede transformarse a:

$$W_v \times q_v = W_p c_e t_2 - W_p c_e t_1$$

Es decir, en otros términos:

$$\textit{Posición válvula de control} = K_1 W_p \times t_1 - K_2$$

ya que t_2 se mantiene constante.

De este modo, un instrumento multiplicador realiza la operación $K_1 W_p t_1$ y otro sumador le resta, a esta señal, la $W_p c_e t_2$ obtenida de la señal de temperatura t_2 combinándose así el control anticipativo y el de realimentación (figura 11.10e). En la figura 11.10f puede verse el mismo tipo de control, pero utilizando un computador.

En los casos de intercambiadores de calor entre líquidos, es usual estabilizar la temperatura del líquido de calefacción o refrigeración en un sistema separado.

Cuando el intercambiador de calor tiene una respuesta demasiado lenta, el mantenimiento de temperatura del producto se realiza con un controlador de temperatura actuando sobre una válvula de tres vías diversora que deriva el intercambiador. De este modo, se logra una respuesta rápida frente al empleo de una válvula de dos vías, ya que la capacidad térmica del intercambiador es grande e introduce un retardo considerable ante cambios en la carga. El producto es derivado y se mezcla directamente con el producto caliente que sale del intercambiador (figura 11.10g).

Una variante del control en derivación se aplica en los casos de intercambiadores de calor entre líquidos, donde es usual estabilizar la temperatura del líquido de calefacción o de refrigeración en un sistema separado. En la figura 11.10h puede verse el control de un intercambiador utilizando aceite térmico obtenido de un sistema separado. A este sistema podría aplicársele, si se deseara, un control en cascada con la temperatura del fluido térmico como variable secundaria.

11.7 Control del reactor en una central nuclear

En una central térmica convencional se utiliza una caldera de vapor con un quemador de fuel-oil o gas (o bien carbón). El calor generado se transfiere al agua de la caldera a través del haz de tubos dispuestos en el interior de la cámara de combustión. El agua se transforma en vapor que, sobrecalentado, pasa a la turbina, que a su vez mueve los generadores correspondientes.

En la central nuclear, la función realizada por la caldera es sustituida por el reactor nuclear combinado con un sistema primario de refrigeración y generadores de vapor.

En los dos sistemas, el control del agua en la caldera y el de la turbina es básicamente el mismo: control de nivel de tres elementos en la caldera y posición de las válvulas de admisión de la turbina para regular el caudal de vapor y, por lo tanto, la potencia de salida. Sin embargo, señalemos que desde un punto de vista simplificado, la caldera de la central térmica es compleja –la potencia de salida gobierna el caudal de combustible y el aire de combustión combinados en la mezcla adecuada, establece el número de quemadores a utilizar y, en muchas plantas, fija la temperatura de sobrecalentamiento– mientras que la central nuclear es básicamente más simple, sólo se requiere el control del consumo del combustible nuclear. La producción de la energía, en el reactor nuclear, se logra mediante la fisión de los átomos del material combustible por el bombardeo con neutrones. El número de éstos da una medida aproximada de la potencia de salida y, para ajustarlo, se posicionan adecuadamente las barras de control de reactividad. El sistema de control emplea como señales de entrada, el flujo de neutrones, las temperaturas, la presión y el caudal del fluido de refrigeración, la posición de las barras de control y las calorías de salida de la planta. Un programa establece la carga a aplicar para alcanzar el nivel de potencia deseado mediante los grupos de las barras de control. En la figura 11.11 puede verse un esquema simplificado del conjunto de los instrumentos utilizados.

El núcleo del reactor contiene termopares de cromel-alumel y detectores móviles de neutrones que proporcionan datos de la distribución de temperaturas y del flujo, lo que permite determinar la distribución de potencia dentro del reactor y calibrar los detectores de flujo externos.

Otra diferencia entre el reactor nuclear y la central térmica es el sistema de paro de la central, ya sea planificado de antemano, ya sea en una emergencia. Mientras que, en la central térmica convencional, el paro se realiza de modo simple –cerrando las líneas de fuel-oil o de gas– y la emergencia puede ser debida a fallos de presión en la línea o de caudal de aire de combustión, en la central nuclear, el paro puede presentarse por pérdida del caudal de refrigerante primario o aumento exagerado de la potencia de salida hasta un nivel de inseguridad. El sistema de emergencia del reactor nuclear debe actuar rápidamente y debe ser de alta confiabilidad.

Los sistemas de seguridad del reactor tienen en cuenta los siguientes puntos:

- Aislamiento del sistema de contención mediante una válvula de bloqueo en cada línea que penetra en las paredes del reactor.
- Mantenimiento del sistema de barras de control y de seguridad en su posición. Si el sistema falla, por manipulación incorrecta o fallos del sistema de movimiento, se produce una liberación de radiactividad que causa un gran desprendimiento de calor. Para eliminarlo, sea en caso de emergencia o bien en caso de paro programado, es necesario que la instrumentación inicie una refrigeración de emergencia, accionando rápidamente las barras de seguridad. La característica de velocidad de éstas es muy importante, y como detalle señalemos que efectúan su carrera completa en un poco más de medio segundo.

Los criterios establecidos para la seguridad de la central nuclear se basan en la confiabilidad y en la redundancia de los instrumentos. Se han redactado normas que establecen métodos para ensayar los contadores de radiactividad, los materiales eléctricos, los motores, los requerimientos de inspección, de instalación y ensayo de los instrumentos, la calificación sísmica y resistencia al calor de los mismos, en particular en el interior de la contención, los ensayos para la comprobación de fallos con el reactor en marcha mediante los sistemas redundantes de instrumentos, etc. El dispositivo

de seguridad es excitado principalmente ante un fallo de alimentación de los instrumentos, una temperatura alta en la refrigeración, un nivel de potencia de salida excesivo o un flujo elevado de neutrones.

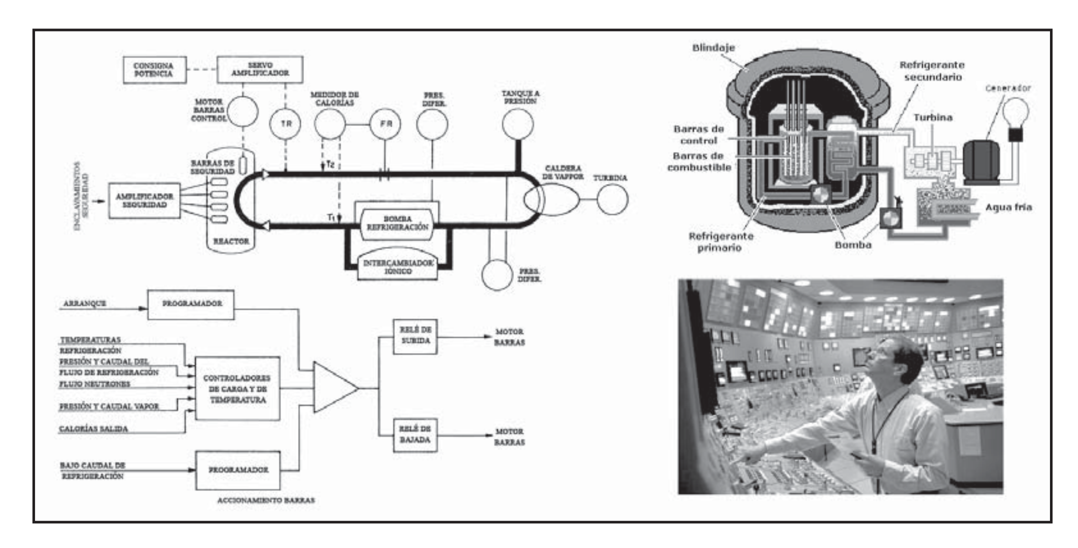


Figura 11.11 *Esquema de control del reactor nuclear. Fuente fotografía: Alexander Cohn - Times File Photo*

El sistema de arranque del reactor debe tener en cuenta la gama tan amplia de niveles de potencia que el reactor puede generar y debe realizar los siguientes puntos:

- Impedir que la reactividad exceda los límites máximos de proyecto dentro de la gama de potencias de trabajo.
- Mantener la adecuada generación de calor en respuesta a la demanda.

La instrumentación no nuclear incluida en el bucle del agua de refrigeración primario del reactor contiene medidores de presión diferencial del núcleo del reactor y de la bomba de refrigeración, transmisores de temperatura y de presión, medidores de caudal de refrigerante, de temperatura diferencial, de calorías, etc.



Apéndice A
Análisis dinámico de los instrumentos

A.1 Generalidades

El lazo de regulación típico se compone del proceso, del instrumento de transmisión, del controlador y del elemento final de control.

El proceso ha sido desarrollado para tratar o transformar el material mediante una serie de operaciones específicas y reviste formas muy diversas. Una aplicación típica la constituye el intercambiador de temperatura de la figura A.1.

El transmisor capta la variable del proceso y la envía bajo una forma neumática, eléctrica, digital, hidráulica o mecánica.

El controlador permite al proceso cumplir su objetivo y realiza dos funciones esenciales:

a) Compara la variable medida con la de referencia o deseada (punto de consigna) para determinar el error.
b) Mediante circuitos especiales estabiliza el lazo de control.

El elemento final de control (válvula de control en la figura A.1) actúa sobre la variable del proceso que hace evolucionar la variable controlada.

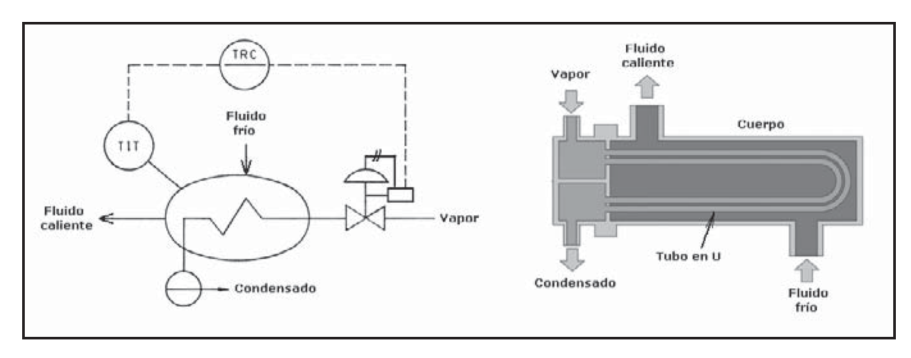


Figura A.1 Intercambiador de calor

El análisis dinámico del proceso estudia la variable controlada del proceso con relación a todas las variables restantes y considera las perturbaciones que pueden producirse. Para este estudio, el análisis dinámico hace uso de los diagramas de bloques que representan cada parte del lazo de control y que describen la relación que existe entre la señal de entrada y la respuesta obtenida ante cada excitación para cada bloque. En la figura A.2 puede verse el diagrama de bloques del circuito de control típico del intercambiador de calor de la figura A.1. En cualquier sistema del proceso pueden dibujarse bloques que representan cada componente físico de la señal.

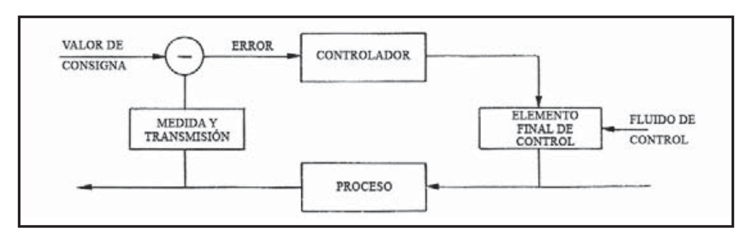


Figura A.2 Diagrama de bloques de un lazo de control

Las señales de entrada y de salida pueden expresarse mediante ecuaciones diferenciales lineales cuya expresión general es:

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \ldots + a_n x = b_0 \frac{d^m y}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \ldots + b_m y \quad (1)$$

Y, que de forma simplificada, puede verse en la figura A.3. Representando, en la expresión anterior, la función derivada por el operador $p = d/dt$.

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \ldots a_n)x = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \ldots + b_m)y$$

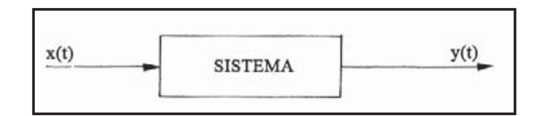


Figura A.3 Transmitancia o función de transferencia

Y, de aquí:

$$\frac{y}{x} = \frac{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \ldots + a_n}{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \ldots + b_m} = W \quad (2)$$

Esta relación entre las expresiones función del tiempo de las señales de salida y de entrada recibe el nombre de *transmitancia* o *función de transferencia*, y es característica del diagrama de bloques, figurando expuesta en el interior del rectángulo símbolo del bloque.

La ecuación que determina la evolución libre del sistema, es decir, con excitación nula $x(t) = 0$, es:

$$b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \ldots + b_m = 0$$

Esta expresión recibe el nombre de *ecuación característica*. Si sus raíces son p_i tenemos:

$$y(t) = \sum c_i e^{p_i t}$$

El sistema será estable si las raíces p_i tienen la parte real negativa, ya que así la curva $e^{p_i t}$ será amortiguada.

Las ecuaciones diferenciales de las funciones de entrada y salida de un sistema son relativamente complejas y difíciles de analizar. A menudo, se emplea una herramienta matemática para resolverlas de forma mucho más cómoda y que es la denominada *Transformada de Laplace*.

La transformada de Laplace de una función $y(t)$ se define como:

$$\mathfrak{L}\left[y(t)\right] = Y(s) = \int_{0^+}^{\infty} y(t) \times e^{-st} dt$$

en la que s es un número complejo $s = \sigma + jw$, la transformada de una variable dependiente y se escribe $Y(s)$, con Y en mayúscula y s adicionada para recordar que la variable y ha sido transformada.

Las propiedades de la transformada de Laplace son las siguientes:

Linealidad:

$$\mathfrak{L}\left[y_1 + y_2\right] = \mathfrak{L}(y_1) + \mathfrak{L}(y_2)$$

Permutabilidad:

$$\mathfrak{L}\left[K(f(t)\right] = K\mathfrak{L}\left[f(t)\right]$$

Derivada:

$$\mathfrak{L}\left[y'(t)\right] = sY(s) - y(0^+)$$

Esta última, aplicada reiteradamente da:

$$\mathfrak{L}\left[y^n(t)\right] = s^n Y(s) - s^{n-1} y(0^+) - s^{n-2} y'(0^+) - s^{n-3} y''(0^+) - \ldots - y^{n-1}(0^+)$$

y con las condiciones iniciales supuestas nulas resulta:

$$\mathfrak{L}\left[y^n(t)\right] = s^n Y(s)$$

y la integral:

$$\mathfrak{L}\left[\int y(t)dt\right] = \frac{Y(s)}{s}$$

Es decir, la transformada de Laplace convierte la operación de integrar en una división por la nueva variable s y la operación de derivar en una multiplicación, es decir, reduce las operaciones analíticas de integrar y derivar a operaciones algebraicas efectuadas sobre las transformadas.

Así pues, una ecuación diferencial lineal se transformará en otra algebraica y sólo restará hallar la antitransformada de esta última expresión para resolver la ecuación diferencial.

Ejemplo

Resolver la ecuación diferencial siguiente para condiciones iniciales $x(0^+)$ = -1, $x(0^+)$ = 2.

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + 3\frac{dx(t)}{dt} + 2x(t) - 5 = 0$$

La transformada de Laplace es:

$$x''(t) = s^2 X(s) - sx(0^+) - x'(0^+) = s^2 X(s) + s - 2$$

$$x'(t) = sX(s) - s(0^+) = +sX(s) + 1$$

Luego:

$$s^2X(s)+s-2+3sX(s)+3+2X(s)-\frac{5}{s}=0$$

$$X(s)=\frac{5-s-s^2}{s(s+1)(s+2)}=\frac{A}{s}+\frac{B}{s+1}+\frac{C}{s+2}$$

Operando sale:

$A = 5/2$

$B = -5$

$C = 3/2$

Luego, la antitransformada es:

$$\mathfrak{L}^{-1}\left[X(s)\right]=\mathfrak{L}^{-1}\left[\frac{5/2}{s}-\frac{5}{s+1}+\frac{3/2}{s+2}\right]=\frac{5}{2}-5e^{-t}s+\frac{3}{2}e^{-2t}$$

$$x(t)=\frac{5}{2}-5e^{-t}s+\frac{3}{2}e^{-2t}$$

La resolución de ecuaciones diferenciales es fácil dada la cantidad de transformadas que ya están resueltas, algunas de las cuales figuran en la tabla A.1

Funciones del tiempo	*Transformadas*
$\delta(t)$	1
$u(t)$	$\frac{1}{s}$
e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
$\frac{dy(t)}{dt}$	$s\,Y(s) - y(0^+)$
$\frac{d^2\,y(t)}{dt^2}$	$s^2\,Y(s) - s\,y(0^+) - y'(0^+)$
$\frac{d^n\,y(t)}{dt^n}$	$s^n\,Y(s) - s^{n-1}\,y(0^+) - \ldots - y^{(n-1)}\,(0^+)$
$\int_0^t y(t)\,dt$	$\frac{Y(s)}{s}$
$\int_0^t\left(\int_0^t\left(\int_0^t y(t)dt\right)dt\right)dt\ldots$ n veces	$\frac{Y(s)}{s^n}$
t	$\frac{1}{s^2}$
$t\,e^{-at}$	$\frac{1}{(s+a)^2}$
$\frac{t^2}{2}$	$\frac{1}{s^3}$

Tabla A.1 Transformada de Laplace

Funciones del tiempo	Transformadas
$\frac{t^2}{2} e^{-at}$	$\frac{1}{(s+a)^3}$
$e^{-at} y(t)$	$Y(s+a)$
$y(t-a)\, u(t-a)$	$e^{-as} Y(s)$
sen ωt	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$
cos ωt	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$

Tabla A.1 continuación Transformada de Laplace

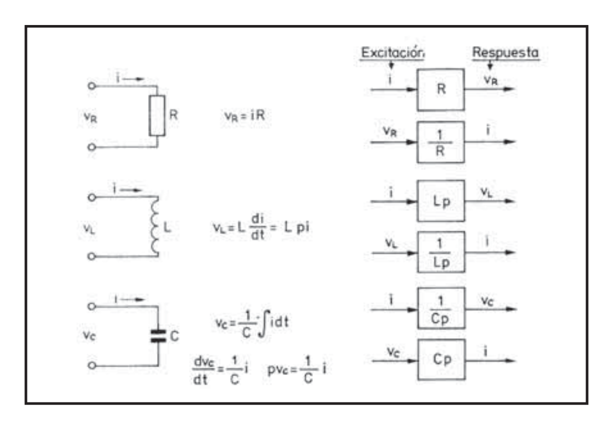
Volviendo a la expresión (1), si aplicamos la transformada de Laplace a los dos miembros y consideramos valores iniciales nulos tenemos:

$$a_0 s^n X + a_1 s^{n-1} X + \ldots + a_n X = b_0 s^m Y + b_1 s^{m-1} Y + \ldots + b_m Y$$

Y:

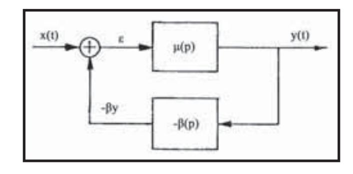
$$\frac{Y}{X} = \frac{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \ldots + a_n}{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \ldots + b_m}$$

Esta operación coincide con la (2), sin más que cambiar el símbolo p por el s, es decir, equivale a la transmitancia. Así, pues, la función de transferencia puede expresarse también como el cociente entre las transformadas de Laplace de las funciones de respuesta y de excitación del sistema que se analiza. Veamos, a continuación, algunos diagramas de bloques y los métodos de simplificación correspondientes:

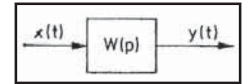


Sea el circuito de realimentación típico que se verá repetidamente a lo largo del texto.

Trabajando con ecuaciones diferenciales y el operador p:



Circuito equivalente:



$$\varepsilon(t) = x(t) - \beta(p)y(t)$$

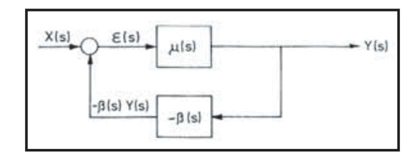
$$y(t) = \mu(p)\varepsilon(t)$$

$$y(t) = \frac{\mu(p)x(t)}{1+\mu(p)\beta(t)}$$

Luego:

$$W(p) = \frac{\mu(p)}{1+\mu(p)\beta(t)} = \frac{1}{\beta(p)+\dfrac{1}{\mu(p)}}$$

Análogo resultado se obtendría trabajando con transformadas de Laplace de las señales de entrada y salida y variable s.



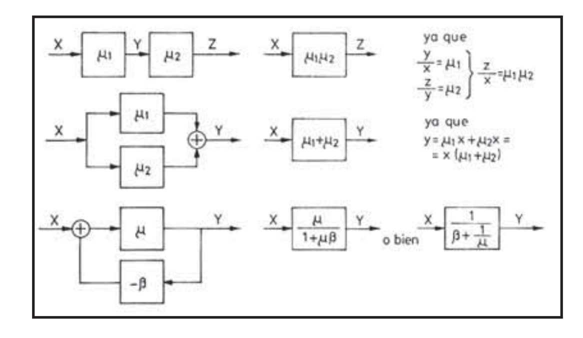
$$\varepsilon = X - \beta Y$$

$$Y = \mu \times \varepsilon$$

$$Y = \frac{\mu X}{1+\mu\,\beta}$$

$$W(s) = \frac{\mu}{1+\mu\beta} = \frac{1}{1+\dfrac{1}{\mu}}$$

Al operar con diagramas de bloques, los métodos de simplificación son:



A.2 Funciones elementales de excitación

A.2.1 Escalón unidad u(t)

Tiene la expresión:

$u(t) = 0$, para $t < 0$

$u(t) = 1$, para $t > 0$

En la figura A.4a puede verse su representación gráfica.

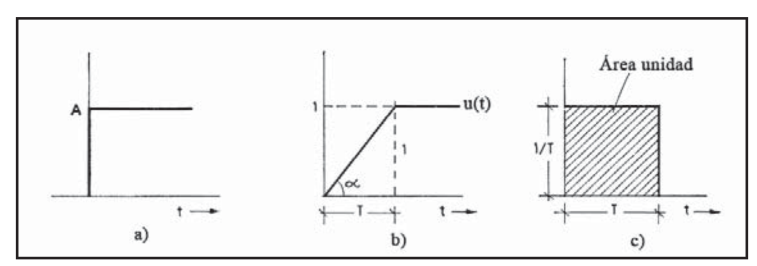


Figura A.4 Funciones elementales de excitación

A.2.2 Impulso unidad

Llamado también *función de Dirac* (figuras A.4b y A.4c) es la derivada de un escalón imperfecto:

$$u(t) = \frac{1}{T}t$$

$$u'(t) = \frac{1}{T}$$

Cuando:

$$\alpha \to 90^o$$

$$T \to 0$$

$$\frac{1}{T} \to \infty$$

Pero el área continúa siendo la unidad:

$$\partial(t) = impulso\ unidad$$

A.2.3 Respuesta impulsional

La respuesta impulsional de un sistema es la que se obtiene al excitarlo con un impulso unidad.

Sea la excitación:

$x(t) = \partial(t)$ (impulso unidad)

Como $\partial(t)$ es 0, excepto entre 0 y T que vale $1/T$ se obtiene:

$$X(s)=\int_{0^+}^{\infty}\partial(t)e^{-st}=\lim_{T\to 0}\int_{0}^{T}\frac{1}{T}e^{-st}dt=\lim_{T\to 0}\frac{1}{T}\left[-\frac{e^{-st}}{s}\right]_0^T=$$

$$=\lim_{T\to 0}\frac{1}{T}\left[\frac{1}{s}-\frac{e^{-sT}}{s}\right]=\lim_{T\to 0}\frac{1-\left[1-sT+...\right]}{sT}=1$$

Luego:

$$W(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}=Y(s)$$

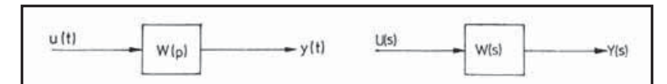
Y deshaciendo la transformación:

$$y(t)=\mathfrak{L}^{-1}\left[W(s)\right]$$

Así, pues, *la respuesta impulsional de un sistema es igual a la antitransformada de Laplace de la transmitancia del sistema.*

A.2.4 Respuesta indicial

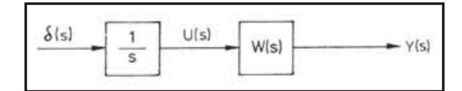
Es la función que se obtiene en la salida al excitar la entrada con un escalón unidad $u(t)$.



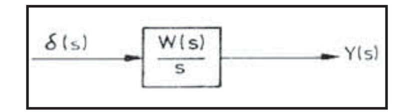
En el sistema de transmitancia $1/s$ excitado con un impulso unidad, la salida es:

$$y(t)=\mathfrak{L}^{-1}\left[\frac{1}{s}\right]=u(t)$$

Luego:



O sea:



Así, pues, *la respuesta indicial de un bloque de transmitancia $W(s)$ es la respuesta impulsional que nos da un bloque funcional cuya transmitancia es $W(s)/s$.*

A.2.5 Respuesta ante una entrada en rampa

Es la función que se obtiene en la salida al excitar la entrada con una rampa unidad. Como la rampa unidad es la integral respecto al tiempo del escalón unidad resulta:

$$r(t) = \int_0^t u(t)dt = tu(t)$$

La transformada de Laplace de la función rampa unidad es:

$$\mathfrak{L}\left[u(t)\right] = \frac{1}{s}$$

$$\mathfrak{L}\left[r(t)\right] = \int_{0^+}^{\infty} e^{-st} r(t)dt = \int_{0^+}^{\infty} te^{-st} u(t)dt = \frac{1}{s^2} = R(s)$$

Luego:



$$W(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{Y(s)}{\frac{1}{s^2}}$$

Luego:

$$Y(s) = \frac{W(s)}{s^2}$$

Y deshaciendo la transformación:

$$y(t) = \mathfrak{L}^{-1}\left[\frac{W(s)}{s^2}\right]$$

Así, pues, *la respuesta de un sistema ante una entrada en rampa unidad es igual a la antitransformada de Laplace de la división de la transmitancia del sistema por s^2.*

El análisis dinámico de los sistemas del proceso se basa fundamentalmente en las respuestas de cada uno de los bloques de la figura A.2. Sin embargo, tal como se verá más adelante, se acostumbra a unir los bloques de proceso, medida, transmisión y elemento final de control en un bloque único, con lo cual el sistema queda sólo reducido a dos bloques, el bloque único citado y el bloque del controlador.

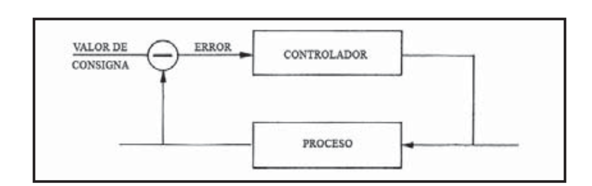


Figura A.5 Diagrama de bloques simplificado del bucle de control

Actuando en manual sobre el controlador, es posible excitar el bloque único del proceso (figuras A.5) con un impulso o con un escalón obteniendo, por lo tanto, las respuestas impulsionales e indiciales, respectivamente. Estos ensayos son de respuesta transitoria y pueden aplicarse tanto al proceso

(bloque único) como al instrumento, facilitando los fabricantes las curvas correspondientes tanto del controlador como de los bloques individuales del proceso (transmisor y elemento final de control).

A.2.6 Respuesta ante una entrada senoidal

Otro tipo de ensayo que puede efectuarse, tanto en el proceso citado como en el controlador, es el de respuesta frecuencial. La función de excitación es una señal senoidal de frecuencia ajustable que, al variar ésta, da lugar a una respuesta también senoidal con módulo y fase variables con relación a los correspondientes de la señal de excitación.

Veamos pues el análisis frecuencial de un sistema:

Con la excitación senoidal $x(t)$ =

x(t) → W → y(t)

La salida $y(t)$ debe ser tal que:

$$Y(s) = W(s) \times X(s) = W(s)\frac{Aw}{s^2 + w^2}$$

Como el sistema debe ser estable, las raíces de la ecuación característica tendrán la parte real negativa para que el sistema se amortigüe. Descomponiendo $Y(s)$ en fracciones parciales:

$$Y(s) = W(s)\frac{Aw}{s^2 + w^2} = \frac{B}{s + p_1} + \frac{C}{s + p_2} + \ldots + \frac{N}{s + p_1} + \frac{P}{s + jw_1} + \frac{Q}{s - jw}$$

Luego:

$$y(t) = \mathfrak{L}^{-1}\left[Y(s)\right] = Be^{-p_1 t} + Ce^{-p_2 t} + \ldots + Ne^{-p_1 t} + \mathfrak{L}^{-1}\left[\frac{P}{s + jw} + \frac{Q}{s - jw}\right]$$

Y como el sistema es estable:

$$\underset{t \to \infty}{y(t)} = \mathfrak{L}^{-1}\left[\frac{P}{s + jw} + \frac{Q}{s - jw}\right]$$

Determinemos P y Q:

$$\frac{N(s)}{D(s)} x \frac{Aw}{s^2 + w^2} = \frac{B}{s + p_1} + \frac{C}{s + p_2} + \ldots + \frac{N}{s + p_1} + \frac{P}{s + jw_1} + \frac{Q}{s - jw} =$$

$$= \frac{\ldots + P(s - jw)D(s) + Q(s + jw)D(s)}{D(s)(s^2 + w^2)}$$

Para:

$$s = jw,\ \ AwN(jw) = Q(2jw)D(jw)$$

$$s = -jw,\ \ AwN(-jw) = P(-2jw)D(-jw)$$

$$P = \frac{AW(-jw)}{-2j} \qquad Q = \frac{AW(jw)}{2j}$$

$$Y(s) = \frac{AW(-jw)}{-2j(s+jw)} + \frac{AW(jw)}{2j(s-jw)}$$

$$y(t) = \frac{AW(-jw)}{-2j} e^{-jwt} + \frac{AW(jw)}{2j} e^{jwt} =$$

$$= \frac{A}{-2j}\left|W(jw)\right| e^{-j\phi} \times e^{-jwt} + \frac{A}{2j}\left|W(jw)\right| e^{j\phi} \times e^{jwt} =$$

$$= A\left|W(jw)\right|\left(\frac{e^{j(wt+\phi)} - e^{-j(wt+\phi)}}{2j}\right) =$$

$$= A\left|W(jw)\right| sen(wt+\phi)$$

Esta es la respuesta ante una excitación senoidal $x(t) = Asen\ wt$, y puede verse que es otra función senoidal de módulo $A\left|W(jw)\right|$ y argumento $wt + \phi$. De aquí, se deduce:

$$\left|W(jw)\right| = Ganancia\ del\ sistema\ =\ G\ =\ \frac{amplitud\ señal\ de\ salida}{amplitud\ señal\ entrada}$$

$$\phi = \arg W(jw) = Desfase\ entre\ la\ señal\ de\ salida\ y\ la\ de\ entrada$$

Eexpresiones en las que la variable s de la transmitancia se ha sustituido por jw. La representación se efectúa en el *plano de Bode* con la ganancia $g = 20log_{10} \times G$ expresada en decibelios (dB) y el desfase, en grados, representados en ordenadas y con la frecuencia en abscisas en unidades logarítmicas. Señalemos que en el plano de Bode se emplean los siguientes términos:

Década. Conjunto de frecuencias comprendidas entre otras cuyo cociente es 10.

Octava. Conjunto de frecuencias comprendidas entre otras cuyo cociente es 2.

Por ejemplo, una función de transferencia con retardo de primer orden da una respuesta frecuencial:

$$W = \frac{1}{1+\tau s}$$

$$W = \frac{1}{1+\tau jw}$$

Y, si:

$$\tau = \frac{1}{w_0}$$

Resulta:

$$G = \left|\frac{1}{1+j\frac{w}{w_o}}\right| = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{w}{w_0}\right)^2}}$$

Aproximaciones asintóticas:

g = 0 si $w < w_0$

$$g = 20 \log \frac{w_0}{w} \text{ si } w > w_0$$

De pendiente -20 dB/década. Estas dos asíntotas se cortan en $w = w_0$, luego:

$$g = 20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} = -3\ dB$$

Y el desfase vale:

$$\phi = arc\ tg\left(-\frac{w}{w_0}\right)$$

Para:

$w = 0$, tenemos que $\phi = 0$

$w = w_0$, tenemos que $\phi = -\pi/4$

$w = \infty$, tenemos que $\phi = -\pi/2$

En la figura A.6 puede verse esta función dibujada para el caso particular $w_0 = 20$ radianes/minuto.

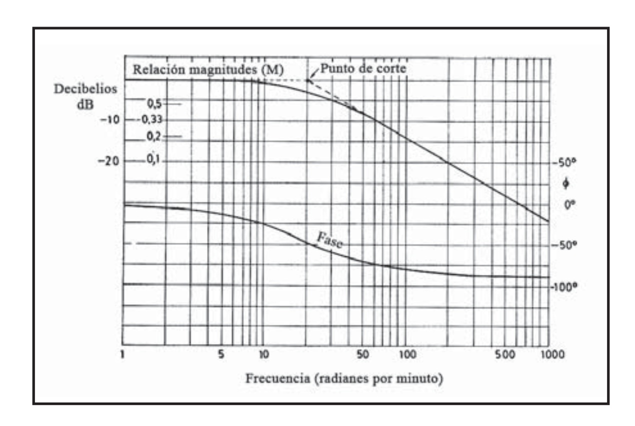


Figura A.6 Retardo de primer orden en el diagrama de Bode

Otra forma de expresar la respuesta es mediante el *diagrama de Nyquist*. Es un diagrama con coordenadas polares en que cada punto de la curva define un módulo y un argumento, representando dicho punto una frecuencia determinada. La función queda definida desde $w = 0$ hasta $w = \infty$. En el ejemplo anterior, la respuesta frecuencial en el diagrama de Nyquist del retardo de 1º orden de función de transferencia:

$$W = \frac{1}{1 + \tau s}$$

Tabla de conversión
g (dB) = 20 log G

g (dB)	Rel. mag. G Ganancia	Pérdida
0,1	1,01	0,989
0,2	1,02	0,977
0,3	1,03	0,966
0,4	1,05	0,955
0,5	1,06	0,944
0,6	1,07	0,933
0,7	1,08	0,923
0 8	1,10	0,912
0,9	1,11	0,902
1,0	1,12	0,891
1,1	1,13	0,881
1,2	1,15	0,871
1,3	1,16	0,861
1,4	1,17	0,851
1,5	1,19	0,841
1,6	1,20	0,832
1,7	1,22	0,822
1,8	1,23	0,813
1,9	1,24	0,803
2,0	1,26	0,794
2,1	1,27	0,785
2,2	1,29	0,776
2,3	1,30	0,769
2,4	1,32	0,759
2,5	1,33	0,748
2,6	1,35	0,741
2,7	1,37	0,734
2,8	1,38	0,724
2,9	1,40	0,716
3,0	1,41	0,708
3,1	1,43	0,698
3,2	1,44	0,692
3,3	1,47	0,683
3,4	1,48	0,676
3,5	1,50	0,668
3.6	1,51	0,661
3,7	1,53	0,652
3,8	1,55	0,646
3,9	1,57	0,639
4,0	1,58	0,631
4,1	1,60	0,623
4,2	1,62	0,617
4,3	1,64	0,609
4,4	1,66	0,603
4,5	1,68	0,595

g (dB)	Rel. mag. G Ganancia	Pérdida
4,6	1,70	0,589
4,7	1,72	0,584
4,8	1,74	0,575
4,9	1,76	0,568
5,0	1,78	0,562
5,1	1,80	0,555
5,2	1,82	0,550
5,3	1,84	0,545
5,4	1,86	0,536
5 5	1,88	0,531
5,6	1,90	0,527
5,7	1,93	0,520
5,8	1,95	0,512
5,9	1,97	0,508
6,0	1,99	0,501
6,1	2,02	0,495
6,2	2,04	0,490
6,3	2,07	0,483
6,4	2,09	0,479
6,5	2,11	0,473
6,6	2,14	0,468
6,7	2,17	0,463
6,8	2,19	0,458
6.9	2,22	0,453
7,0	2,24	0,447
7,1	2,27	0,442
7,2	2,29	0,438
7,3	2,33	0,433
7,4	2,35	0,427
7,5	2,37	0,422
7,6	2,40	0,417
7,7	2,43	0,412
7,8	2,46	0,407
7,9	2,48	0,403
8,0	2,51	0,398
8,1	2,55	0,394
8,2	2,57	0,388
8,3	2,61	0,385
8,4	2,63	0,380
8,5	2,66	0,376
8,6	2,70	0,371
8,7	2,73	0,367
8,8	2,76	0,363
8,9	2,79	0,360
9,0	2,82	0,355

g (dB)	Rel. mag. G Ganancia	Pérdida
9,1	2,85	0,351
9,2	2,88	0,347
9,3	2,92	0,343
9,4	2,95	0,339
9,5	2,98	0,335
9,6	2,02	0,330
9,7	3,06	0,326
9,8	3,10	0,323
9,9	3,13	0,321
10,0	3,16	0,316
10,3	3,27	0,305
10,5	3,35	0,297
10,7	3,43	0,292
11,0	3,55	0,282
11,3	3,67	0,273
11,5	3,76	0,266
11,7	3,84	0,258
12,0	3,98	0,251
12,3	4,13	0,243
12,5	4,23	0,236
12,7	4,33	0,232
13,0	4,47	0,224
13,3	4,64	0,216
13,5	4,75	0,212
13,7	4,86	0,206
14,0	5,01	0,199
14,3	5,19	0,193
14,5	5,31	0,187
14,7	5,45	0,183
15,0	5,62	0,178
15,3	5,83	0,172
15,5	5,99	0,167
15,7	6,11	0,163
16,0	6,31	0,158
16,3	6,52	0,155
16.5	6,69	0,149
16,7	6,82	0,146
17,0	7,08	0,141
17,3	7,34	0,137
17,5	7,50	0,133
17,7	7,69	0,130
18,0	7,94	0,126

g (dB)	Rel. mag. G Ganancia	Pérdida
18,3	8,21	0,122
18,5	8,43	0,118
18,7	8,64	0,116
19,0	8,94	0,112
19,3	9,25	0,108
19,5	9,46	0,106
19,7	9,65	0,103
20,0	10,0	0,100
21,0	11,2	0,089
22,0	12,6	0,079
23,0	14,2	0,071
24,0	15,8	0,063
25,0	17,8	0,056
26,0	20,1	0,050
27,0	22,4	0,045
28,0	25,2	0,040
29,0	28,2	0,035
30,0	31,6	0,032
31,0	35,5	0,028
32,0	40,0	0,025
33,0	44,9	0,022
34,0	50,2	0,020
35,0	56,2	0,018
36,0	63,2	0 016
37,0	70,9	0,014
38,0	79,5	0,013
39,0	89,2	0,011
40,0	100	0,010
41,0	112	0,009
42,0	126	0 008
43,0	141	0,007
44,0	158	0,006
45,0	178	0,006

Será:

$$Modulo = G\left|\frac{1}{1+j\dfrac{w}{w_0}}\right| = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\dfrac{w}{w_0}\right)^2}} \qquad Argumento = \phi = arc\ tg\left(\frac{-w}{w_0}\right)$$

Varios puntos de la curva serán:

$$w = 0 \qquad G = 1 \qquad \phi = 0$$

$$w = w_0 \qquad G = \frac{1}{\sqrt{2}} \qquad \phi = -\pi/4$$

$$w = \infty \qquad G = 0 \qquad \phi = -\pi/2$$

El diagrama de Nyquist puede verse en la figura A.7.

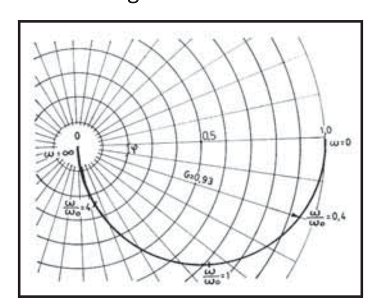


Figura A.7 Retardo de 1° orden en el diagrama de Nyquist

A.3 Análisis dinámico de los transmisores

El transmisor es un componente del bucle de control, según puede verse en la figura A.8, que representa un control típico de regulación de temperatura en un intercambiador de calor. En el ensayo de transmisores neumáticos, electrónicos y digitales se evalúan las siguientes características: error, conformidad a la curva ideal de transmisión, histéresis, repetibilidad, zona muerta, vibraciones, deriva, respuesta indicial (a un escalón), respuesta frecuencial, etc.

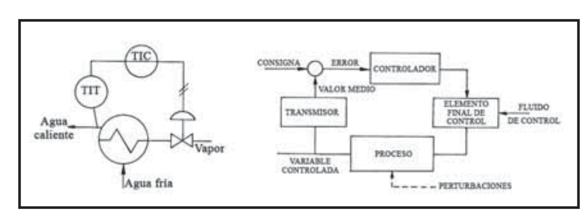


Figura A.8 Intercambiador de calor y su diagrama de bloques

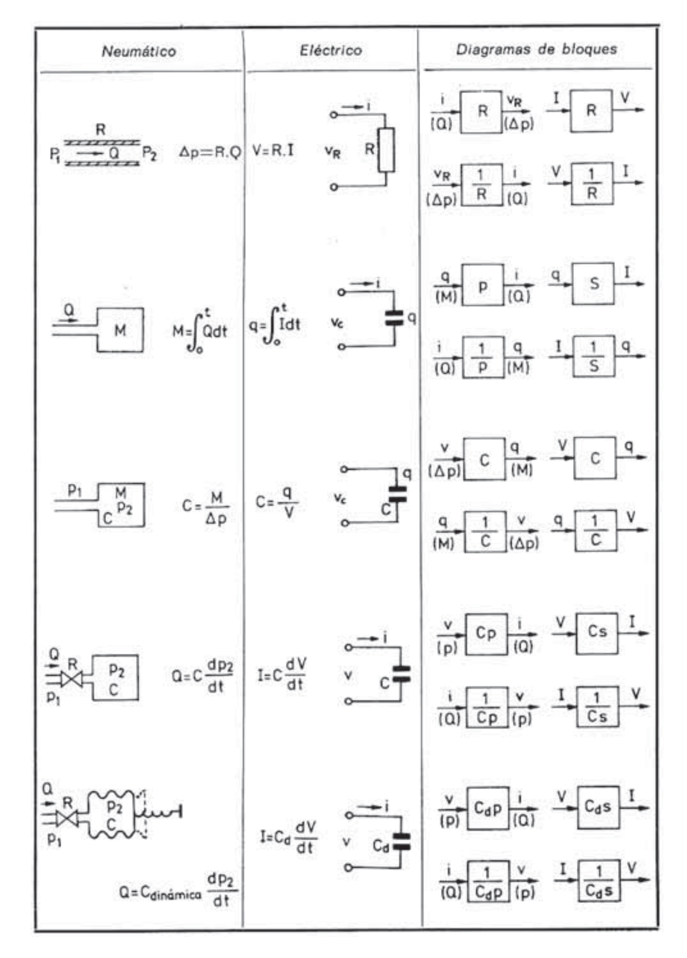
A.3.1 Elementos fundamentales

En la tabla que sigue figura un cuadro comparativo de los elementos fundamentales de los instrumentos neumáticos y electrónicos, el diagrama de bloques y la función de transferencia correspondiente.

A.3.2 Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor

A.3.2.1 Transmisor electrónico

El transmisor electrónico general, cuyo diagrama de bloques se representa en la figura A.9, contiene en su esencia un detector que puede ser de inductancia, transformador diferencial o fotoeléctrico, una unidad magnética de realimentación o el servomotor (en el detector fotoeléctrico) y un amplificador.



Cuadro resumen de circuitos nemáticos y eléctricos

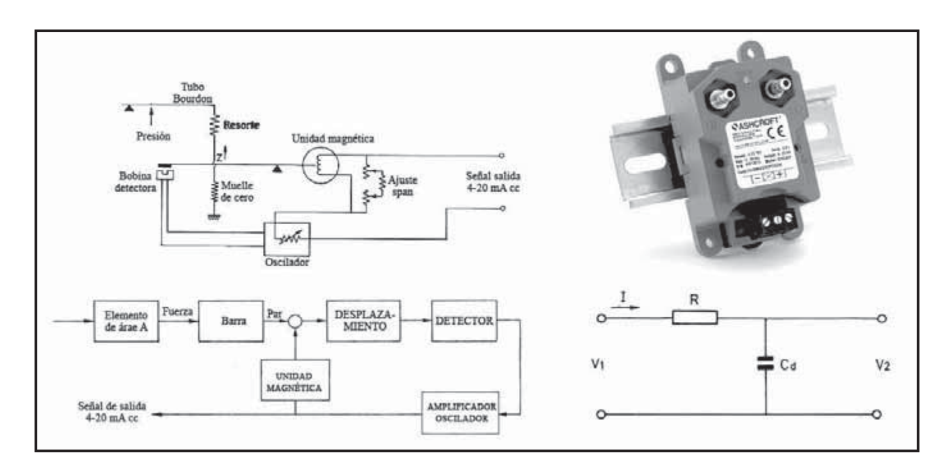
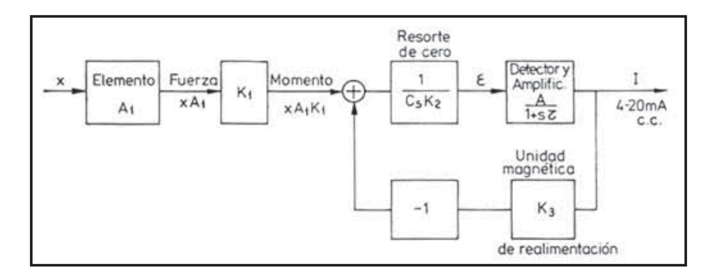


Figura A.9 Diagrama de bloques de un transmisor electrónico típico

El diagrama de bloques correspondiente al sistema es:



Que simplificado da como función de transferencia:

$$\frac{1}{x} = A_1 K_1 \times \frac{\dfrac{A}{C_s K_2 (1+s\tau)}}{1+\dfrac{A}{C_s K_2(1+s\tau)}} = \frac{A_1 K_1 A}{C_s K_2 (AK_3 + C_s K_2)} \times \frac{1}{1 + s\tau \dfrac{C_s K_2}{AK_3 + C_s K_2}}$$

Que corresponde al circuito de primer orden representado en la figura A.6, desplazando la curva de ganancia en:

$$20 \log \frac{A_1 K_1 A}{C_s K_2 (AK_3 + C_s K_2)}$$

Y con una frecuencia de corte:

$$w_0 = \frac{AK_3 + C_s K_2}{\tau C_s K_2}$$

Como $A/(1 + s\tau)$ es muy elevado, resulta como valor de la función de transferencia simplificada:

$$\frac{1}{x} = \frac{A_1 K_1}{K_3}$$

A.3.2.2 Transmisor digital

En el transmisor digital, el elemento piezo-resistivo o capacitivo está sometido directamente a la variable de proceso, por lo cual no tiene prácticamente retardo. Sin embargo, en variables tales como la temperatura hay que añadir el retardo correspondiente al elemento (sonda de resistencia o termopar introducidos en una vaina) y en otras variables de captación rápida, como la presión o el caudal, el retardo inherente al trabajo del microprocesador. Cuanto mayores sean las funciones de programación asignadas al transmisor, tanto mayor será el retardo.

Figuran a continuación algunos datos de la prueba del transmisor ST3000 de Honeywell en la organización TNO.

Tiempo de respuesta indicial (escalón):

0,62 a 0,64 segundos para una señal en escalón del 10% del campo

0,80 a 0,88 segundos para una señal en escalón del 90% del campo

Respuesta frecuencial a 1000 mbar al aplicar entradas senoidales de amplitud el 10% del campo (*span*) se obtuvieron los datos:

Amortiguación = 0

Ganancia relativa = 0,7 a 1,07 Hz

Desfase = 45° a 0,32 Hz

Exactitud a los valores del 100%, 50% y 10% del campo de medida:

Corriente de salida:

+0,01% a -0,09%. Linealidad 0,04%. Histéresis máxima 0,02%. Repetibilidad máxima 0,01%

Señal de salida digital:

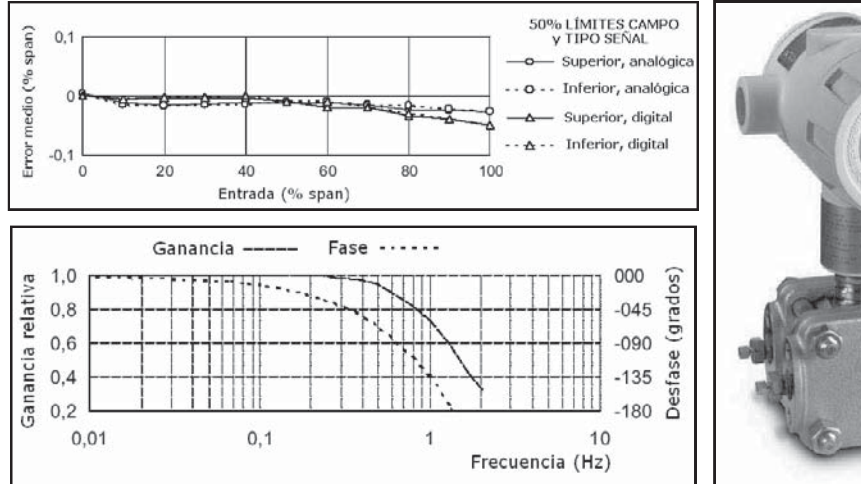
+0,01% a -0,10%. Linealidad = 0,02%

Zona muerta = 0,01%

Fiabilidad de 470 años de tiempo medio entre fallos (MTBF = *Mean Time Between Failures*):

Rangeabilidad de 400 a 1

Vida útil garantizada de 15 años



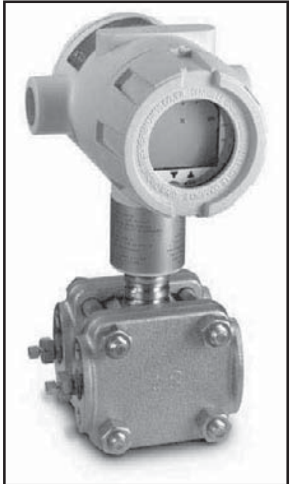


Figura A.10 Exactitud y respuesta frecuencial del transmisor de presión diferencial Honeywell ST3000. Fuente: TNO

A.4 Análisis dinámico de los controladores

A.4.1 Introducción

El análisis armónico permite descubrir el comportamiento dinámico de los diferentes controladores, así como la influencia que tienen los ajustes de las acciones proporcional, integral y derivada. El análisis lleva a dibujar el diagrama de Bode o el de Nyquist que representan la respuesta en frecuencia del controlador (relación entre las amplitudes y desfases en las señales de salida y de entrada en función de la frecuencia). Si el proceso a controlar (elemento final de control + proceso en sí + transmisor)

es igualmente identificado por un diagrama de Bode o de Nyquist, es fácil estudiar analíticamente la estabilidad del sistema y determinar el ajuste óptimo de los parámetros del controlador.

Para el desarrollo del análisis dinámico de los controladores se establece un esquema funcional de cada instrumento con sus correspondientes diagramas de bloques y se escribe su función de transferencia en forma simbólica.

A.4.2 Acción proporcional

A.4.2.1 Controlador electrónico

El diagrama de bloques correspondiente a un *controlador electrónico* (figura A.11), es:

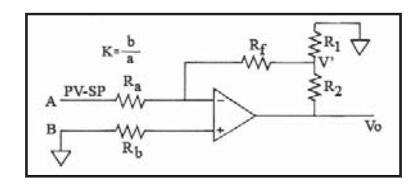
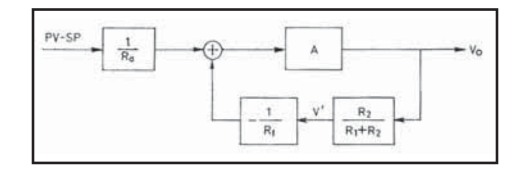


Figura A.11 Controlador electrónico proporcional



Siendo la corriente de realimentación muy débil, la tensión en V' equivale a:

$$V' = V_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Y como la ganancia en tensión A del amplificador operacional es muy alta, el diagrama de bloques equivalente al anterior es:

PV-SP → $\frac{R_f}{R_a} \cdot \frac{R_1+R_2}{R_2}$ → Vo

Lo que indica un desfase nulo entre las señales de entrada y salida y una ganancia constante:

$$g = \frac{R_f}{R_a} \times \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Que puede variarse cambiando la posición del cursor del potenciómetro R_1R_2. Estas características corresponden a las de un controlador proporcional ideal.

A.4.2.2 Control por ordenador

En el *control por ordenador*, el computador digital, en la forma de adquisición de datos o bien bajo la forma de control digital directo (DDC), o en la forma de control supervisor (SCADA) o de control distribuido, muestrea cada cierto tiempo el valor de la señal de la variable de proceso.

En la figura A.12, correspondiente al control de composición de la primera bandeja de una columna de destilación, el muestreador toma las muestras cada t segundos y está cerrado un tiempo que es pequeño comparado con el intervalo de muestreo. Las señales intermitentes que va recogiendo el muestreador son demasiado "ruidosas" para ser utilizadas después por un aparato analógico, por lo cual son convertidas a señales en escalón a través de un dispositivo que las enclava, es decir, las retiene en su último valor, llamado dispositivo de retención.

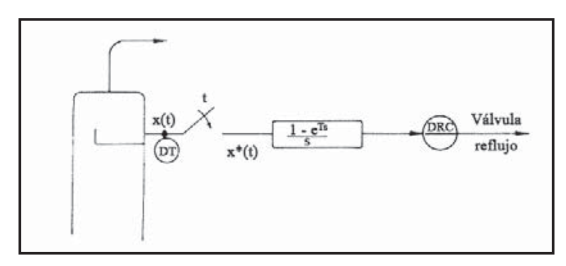


Figura A.12 Muestreador y dispositivo de retención.

El conjunto muestreador-dispositivo de retención convierte la función continua de entrada $x(t)$ (variable de proceso) en escalones uniformemente espaciados $x*(t)$.

La forma más sencilla del elemento de retención es la llamada de orden cero, en la cual la señal de salida se mantiene constante durante todo el intervalo de muestreo y es igual a la magnitud del pulso en el inicio del intervalo. Así pues, el incremento de la señal de salida del elemento de retención es la diferencia entre dos escalones consecutivos:

$$x(t) = x(nT)\left(t\right) - x(nT)\times\left(t - T\right)$$

Y la transformada de la señal de salida es:

$$x(s) = [x(nT)/s] - [x(nT)/s]\times e^{-Ts} = x(nT)\times[(1-e^{-Ts})/s]$$

Y como el valor de la muestra tomada en el tiempo t a la concentración $c(nT)$ es:

$$x^*(t) = c(nT)d(t)$$

Resulta:

$$x^*(s) = x(nT)$$

Luego, la función de transferencia de un elemento de retención de primer orden es:

$$G(s) = \frac{x(s)}{x^*(s)} = \frac{1-e^{-Ts}}{s}$$

El transmisor DT mide el valor $x*(t)$ de la muestra y lo transmite al controlador DRC, que a su vez actúa sobre la válvula V que modifica el reflujo de la columna. Como ya se ha dicho, el verdadero valor de la muestra se toma sólo al inicio del período de muestreo T, de tal modo que en la señal $x*(t)$ se ha perdido parte de la información de $x(t)$.

A señalar que el período de muestreo debe ser al menos el doble que el correspondiente al crítico del sistema, entendiendo por período crítico el que contenga las señales de perturbación que puedan

afectar al sistema; de este modo, no se perderá la información necesaria para controlar bien el sistema y compensar las perturbaciones que se presenten.

Ocurre que el muestreo de una función continua, tal como una función senoidal de frecuencia w_0, contiene un componente primario de frecuencia w_0 y de otros complementarios de frecuencias $w_0 + w_s$, $w_0 + 2w_s$, $w_0 + 3w_s$, etc. Si la función continua contiene varias ondas senoidales de frecuencias distintas y el período de muestreo es alto, bastará colocar un filtro que elimine las componentes complementarias. Pero si el período de muestreo es bajo, existirá un solape entre los componentes complementarios y la señal primaria, y el filtrado de la señal muestreada no podrá recuperar la señal original.

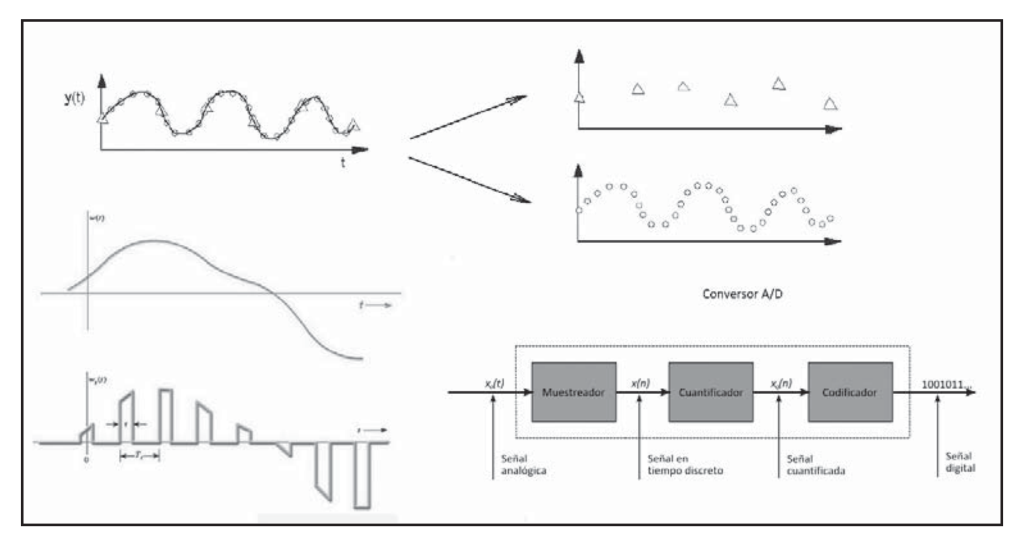


Figura A.13 *Periodo de muestreo*

Los períodos de muestreo adecuados en los controladores digitales de los procesos industriales dependen de las perturbaciones en la variable medida. Se recomiendan los valores en segundos de 5 en la presión, 1 en el caudal, 10 en el nivel y 20 en la temperatura, e incluso valores inferiores si el controlador es de acción derivada. Otro criterio para elegir el tiempo de muestreo es determinar primero el tiempo ($T_{95\%}$) de respuesta indicial del proceso para alcanzar el 95% de su valor final. El tiempo de muestreo debe estar comprendido entre los valores:

$$(1/15)\times T(95\%) < T_m < (1/4)\times T(95\%)$$

La señal muestreada $x^*(t)$ puede considerarse como el producto del impulso unidad $d(t)$ y del valor instantáneo de la señal continua $x(t)$ en el momento de la toma de la muestra.

Para $t = 0°$:

$$x^*(t) = x(0)\times d(t)$$

Para $t = T°$:

$$x^*(t) = x(T)\times d(t-T)$$

Para $t = 2T°$:

$$x^*(t) = x(2T) \times d(t - 2T)$$

Y generalizando:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) \times d\left(t - nT\right)$$

Como expresión en el dominio del tiempo.

En el dominio de las s, la transformada de Laplace es:

$$X^*(s) = x(nT) \times L\left[d(t - nT)\right] = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) \times e^{-nTs}$$

Y sustituyendo s por jw, determinaremos la respuesta frecuencial:

$$X^*(jw) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) \times e^{-jnTw}$$

El controlador de pulsos, programado en el computador digital, en el instante nT del muestreo número n determina el error $e(t) = e(nT) = e_n$ entre la variable y el punto de consigna. En el muestreo anterior el error era $e_{n-1} = e[(n-1)T]$.

La señal de salida y_n del controlador es el llamado algoritmo de control o ecuación de diferencias finitas:

$$y(nT) = a_0 e(nT) + a_1 e(nT - T) + a_2 e(nT - 2T) + ... + a_m e(nT - mT) -$$

$$-b_1 m(nT - T) - b_2 m(nT - 2T) - ... - b_n e(nT - mT)$$

La determinación de dichos coeficientes puede realizarse analizando el proceso y utilizando métodos parecidos a los empleados en las transformadas de Laplace (técnicas de lugar geométrico de raíces y de respuesta frecuencial en el plano z que no estudiaremos).

Muchos algoritmos de control son aproximaciones a las ecuaciones de los controladores convencionales. El algoritmo del controlador incremental empleado en las ecuaciones de estado es:

$$y = KP \times \{E(nT) - E[(n-1)T] + (T / TR) \times E(nT)\} +$$

$$+(TD / T) \times \{E(nT) - 2 \times E[(n-l)T] + E[(n-2)T]\} \qquad (2)$$

Las ecuaciones de estado definen, en forma de matrices, los sistemas físicos cuyo comportamiento cambia con el tiempo y en las que, conocidas las funciones de entrada en un tiempo t, quedan definidas las funciones de salida y son útiles en la simulación de unidades de proceso, secaderos, hornos, columnas de destilación, etc.

Las ecuaciones de estado quedan definidas por un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales que describen la dinámica del sistema y que se trasladan a una forma vectorial matricial. Su expresión general es:

$$\dot{X} = AX + Bu$$

Donde:

$\dot{X}$ = vector de derivadas de las variables de estado de orden n

$A(t)$ = matriz cuadrada de n x n elementos de constantes, parámetros o características físicas o dinámicas del sistema

$X(t)$ = vector matriz de las variables de estado x de orden n

$B(t)$ = matriz de constantes de orden n de la señal de entrada

$u(t)$ = matriz de entradas del sistema

Dentro de la ecuación de estado, la forma matricial del controlador digital *PID* es:

$$U(1,1) = -KP\ (X(2,1) - Z(2) + (T/TR)\ (X(2,1) + (TD/T) \times (X(2,1) - 2 \times Z(2) + Z(1)))$$

en la que:

$U(1,1)$ = señal enviada a la válvula de control, es decir, señal de salida del controlador

$X(2,1)$ = error, es decir, incremento de la variable con relación al punto de consigna

$Z(2)$ = valor del error un incremento de tiempo antes

$Z(1)$ = valor del error dos incrementos de tiempo antes

KP = ganancia del controlador proporcional (100/banda proporcional)

TR = tiempo de acción integral en minutos/repetición

TD = tiempo de la acción derivada en minutos de anticipo

A.4.2.3 Diagrama de Bode

De la expresión general (2) (control *PID*), la parte correspondiente al *control proporcional* es:

$$y(nT) = KP \times E(nT)$$

siendo:

KP = ganancia

E = error (diferencia entre el punto de consigna y la variable)

T = período de muestreo

nT = tiempo transcurrido desde el inicio de los cálculos

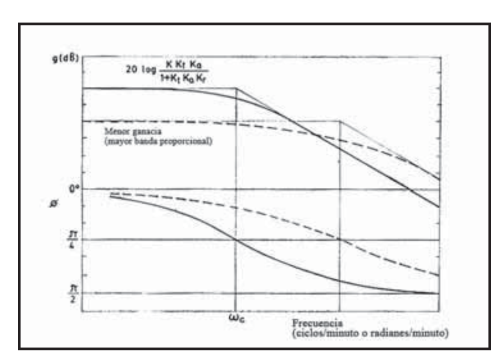


Figura A.14 Diagrama de Bode de un controlador proporcional

En la figura A.14 puede verse el diagrama de Bode de un instrumento de acción proporcional.

A.4.3 Acción proporcional + integral

En el controlador electrónico simplificado *PI* de la figura A.15, se tiene el siguiente diagrama de bloques:

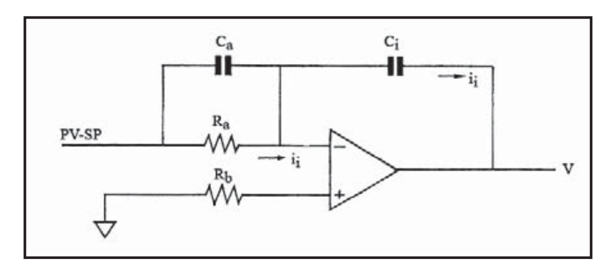
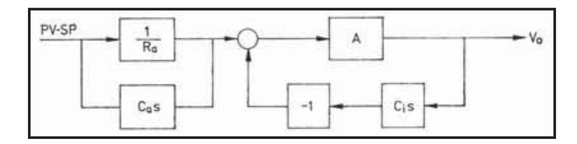
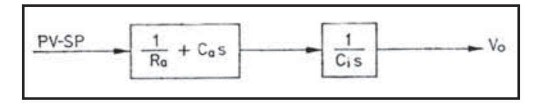


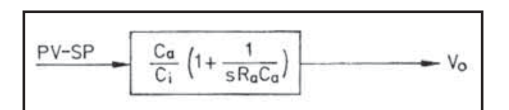
Figura A.15 Controlador electrónico PI



Que simplificado da:



Que equivale a:



Llamando:

$$R_a C_a = \tau_1$$

Y:

$$g_0 = C_a / C_1$$

Queda como función de transferencia:

$$\frac{V_0}{PV - SP} = g_0 \left(1 + \frac{1}{s\tau_1} \right)$$

Expresión cuyo diagrama de Bode corresponde a la figura A.16. La ecuación diferencial del controlador *PI* se deduce de la función de transferencia sustituyendo la variable compleja s por el operador $p = d/dt$ de la derivación.

De este modo, tenemos:

$$\frac{P_0}{\varepsilon} = g_0\left(1 + \frac{1}{\rho\,\tau_i}\right) = g_0 + g_0\frac{1}{\rho}\frac{1}{\tau_i}$$

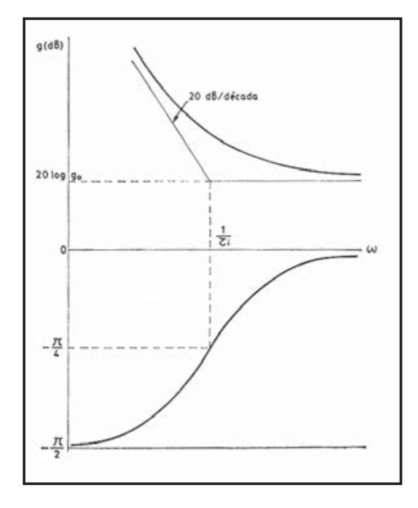


Figura A.16 *Diagrama de Bode simplificado de un controlador PI*

Y, como $1/p$ es el operador de la integración:

$$P_0 = g_0\varepsilon + g_0\frac{1}{\tau_i}\int_0^t \varepsilon\, dt$$

De la expresión general (2) (control *PID*), la parte correspondiente al control *PI* es:

$$y(nT) = KP \times E(nT) + (T\,/\,TR) \times \left[suma\ errores\ E(nT)\right]$$

siendo:

KP = ganancia

TR = tiempo de acción integral en minutos/repetición

E = error (diferencia entre el punto de consigna y la variable)

T = período de muestreo

KT = tiempo transcurrido desde el inicio de los cálculos

O bien, en forma de señal incremental:

$$y(nT) = KP \times \left\{E\left[\left(n-1\right)T\right] - E(nT) + (T\,/\,TR) \times E\left[\left(n-1\right)T\right]\right\}$$

En la figura A.16 puede verse la respuesta frecuencial del controlador proporcional + integral. De esta figura pueden sacarse las siguientes conclusiones:

a) En perturbaciones de baja frecuencia, el efecto de la acción integral es importante: aumenta la ganancia y baja el desfase (mínimo de 90°) de la curva de respuesta frecuencial del proceso.

b) En perturbaciones de alta frecuencia, el efecto de la acción integral es despreciable: no aumentan apreciablemente ni la ganancia ni el desfase.

A.4.4 Acción proporcional + derivada

En el controlador electrónico simplificado *PD* de la figura A.17, se tiene el siguiente diagrama de bloques:

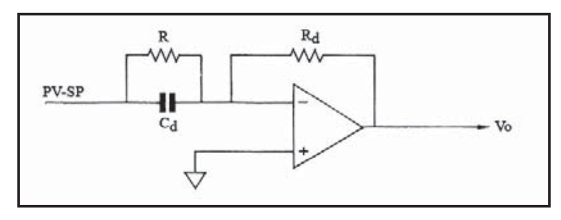
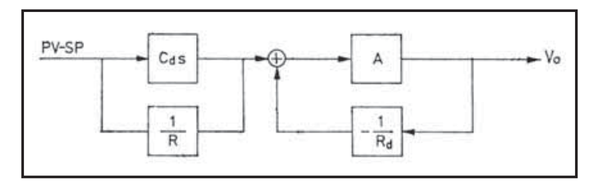
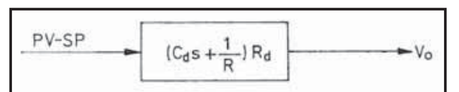


Figura A.17 Controlador PD



Cuyo diagrama equivalente es:



Y llamando $RC_d = \tau_d$ y $(R_d / R) = g_0$ resulta:

$$\frac{V_0}{PV - SP} = g_0(1 + \tau_d s)$$

En los instrumentos electrónicos, si la señal de entrada varía rápidamente (cambio rápido en el punto de consigna o bien una señal con ruido), se produce una respuesta violenta en la salida. Para evitarlo se intercala un condensador C_1 en paralelo con la resistencia derivativa, tal como puede verse en la figura A.18.

La impedancia del condensador C_1 depende inversamente del grado de variación de tensión que se le aplica; una variación rápida de tensión en el condensador presenta una baja impedancia a través de la resistencia derivativa y, por lo tanto ,disminuye el tiempo de acción derivada.

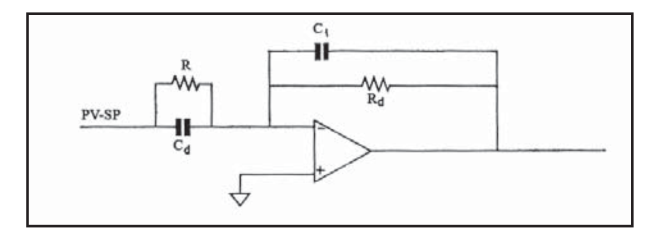
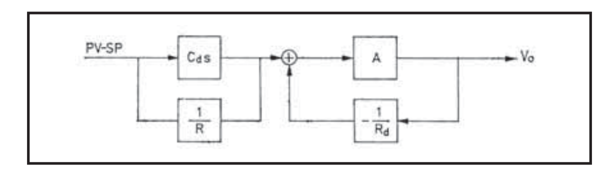
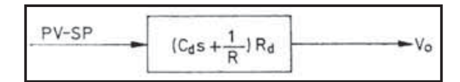


Figura A.18 Controlador electrónico con acción derivada modificada

El diagrama de bloques del circuito es el siguiente:



Y su equivalente:



Luego:

$$\frac{V_0}{PV - SP} = \frac{R_d}{R} \times \frac{1 + RC_d s}{1 + R_d C_1 s}$$

Con:

$$g_0 = (R_d / R)$$
$$\tau_d = RC_d$$
$$\tau_{d'} = R_d C_1$$

En el control por ordenador, la expresión correspondiente basada en la expresión (2) del controlador *PID*, es, en forma incremental:

$$y(nT) = KP \times \{E(nT) - E[(n-1)T]\} + (TD/T) \times \{E(nT) - 2 \times E[(n-1)T] + E[(n-2)T]\}$$

siendo *TD* el tiempo de acción derivativa en minutos de anticipo.

La acción derivada que realiza el ordenador digital tiene el inconveniente del tiempo de muestreo. La señal recibida a través de los transmisores y convertidores analógico-digitales está formada por un cierto número de dígitos, según sea la resolución del convertidor *A/D*. Como la acción derivada calcula la velocidad de variación entre dos muestreos sucesivos, lógicamente esta velocidad será infinita cuando las dos señales consecutivas no sean iguales. La solución es la incorporación de filtros, si bien ello trae como consecuencia una cierta degradación en el comportamiento de la acción derivada.

La respuesta frecuencial se obtendrá sustituyendo s por jw en la función de transferencia:

$$\frac{P_0}{\varepsilon} = g_0 \frac{1 + jw\tau_1}{1 + jw\tau_2} \quad \text{con } \tau_1 > \tau_2$$

$$\frac{P_0}{\varepsilon} = g_0 \frac{1 + w^2 \tau_1 \tau_2}{1 + w^2 {\tau_2}^2} + jg_0 \frac{\omega \tau_1 - w\,\tau_2}{1 + w^2 {\tau_2}^2}$$

Con lo cual resulta:

$$g = 20 \log g_0 \sqrt{\frac{1 + w^2 {\tau_1}^2}{1 + w^2 {\tau_2}^2}}$$

$$\phi = arc\ tg\ \frac{w\tau_1 - w\tau_2}{1 + w^2\tau_1\tau_2}$$

La representación en el diagrama de Bode puede verse en la figura A.19 y se ha deducido según los siguientes puntos:

$W = 0 \quad g = 20\ log\ g_0 \quad w = \infty \quad g = 20\log g_0 \frac{\tau_1}{\tau_2}$

ϕ = 0° ϕ = 0°

Valor máximo de ϕ:

$$(tg\ \phi)' = \frac{(\tau_1 - \tau_2)(1 - w^2\tau_1\tau_2)}{(1 + w^2\tau_1\tau_2)^2} = 0 \quad w = \frac{1}{\sqrt{\tau_1\tau_2}} \quad tg\ \phi = \frac{\tau_1 - \tau_2}{2\sqrt{\tau_1\tau_2}} \quad g = 20\log g_0\sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}}$$

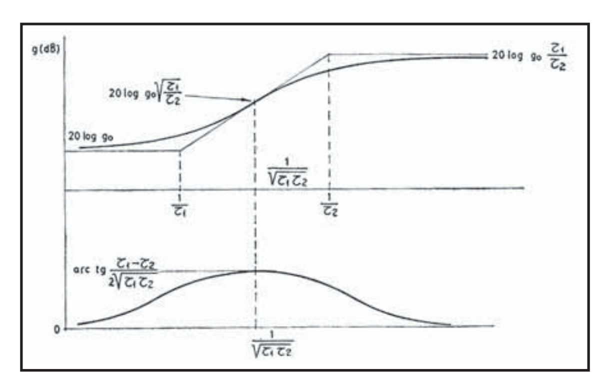


Figura A.19 Diagrama de Bode de un controlador PD modificado

Varias conclusiones pueden deducirse de las figuras representadas:

a) En perturbaciones de baja frecuencia, el efecto de la acción derivada es despreciable: no aumentan apreciablemente ni la ganancia ni el desfase.

b) En perturbaciones de alta frecuencia, el efecto de la acción derivada es importante: aumentan la ganancia y el desfase de dichas perturbaciones.

c) El tiempo de la acción derivada en minutos de anticipo es la inversa de la W en radianes/minuto, correspondiente al cruce de las asíntotas de la curva de ganancia o bien al punto de desfase de +45°.

La acción derivada tiene el inconveniente de que, ante una señal de entrada en escalón o de pendiente pronunciada, el valor tan elevado de la derivada del error da lugar a una respuesta violenta del elemento final de control. Tal como se ha indicado, para evitarlo se utiliza la acción derivada modificada que origina una respuesta más suave que la acción derivativa normal.

A.4.5 Acción proporcional + integral + derivada

Este controlador incorpora las tres acciones (proporcional + integral + derivada) y suma en cada instante los valores correspondientes a cada una de ellas. El controlador electrónico *PID* suele montarse

en cascada. En la figura A.20 puede verse el esquema de un controlador electrónico cuyo diagrama de bloques es el siguiente:

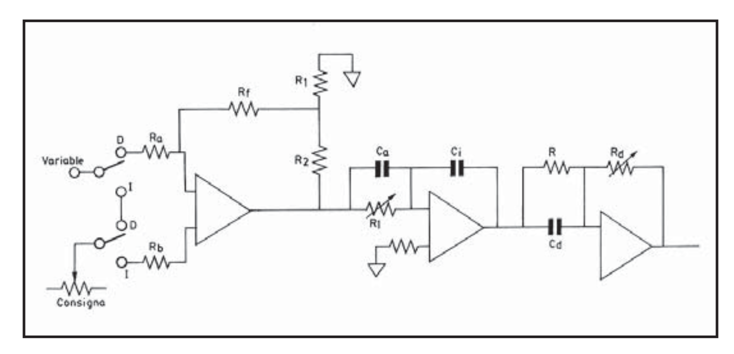
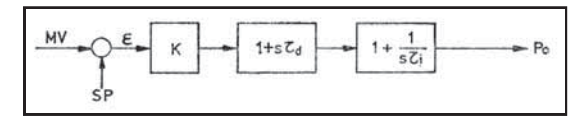


Figura A.20 Controlador electrónico PID



Lo que representa la siguiente función de transferencia:

$$\frac{P_0}{\varepsilon} = K(1 + s\tau_d)\left(1 + \frac{1}{s\tau_1}\right)$$

La respuesta frecuencial es:

$$\frac{P_0}{\varepsilon} = K(1 + jw\tau_d)\left(1 + \frac{1}{jw\tau_i}\right) = K\left(1 + \frac{\tau_d}{\tau_i}\right) + j \times K\left(w\tau_d - \frac{1}{w\tau_i}\right)$$

De aquí:

$$g = 20 \log K\sqrt{\left(1 + \frac{\tau_d}{\tau_i}\right)^2 + \left(w\tau_d - \frac{1}{w\tau_i}\right)^2}$$

$$\phi = arc\ tg\ \frac{w\tau_d - \dfrac{1}{w\tau_i}}{1 + \dfrac{\tau_d}{\tau_i}}$$

En el control por ordenador, la expresión (2) ya deducida correspondiente del control *PID* es, en forma incremental:

$$y(nT) = KP \times \left\{E(nT) - E\left[(n-1)T\right] + \left(T/TR\right) \times E(nT)\right\} + \left(TD/T\right) \times \left\{E(nT) - 2 \times E\left[(n-1)T\right] + E\left[(n-2)T\right]\right\}$$

siendo:

KP = ganancia

E = error (diferencia entre el punto de consigna y la variable)

T = período de muestreo

TR = tiempo de acción integral en minutos/repetición

TD = tiempo de acción derivativa en minutos de anticipo

nT = tiempo transcurrido desde el inicio de los cálculos

En la figura A.21 puede verse la respuesta frecuencial del controlador *PID*.

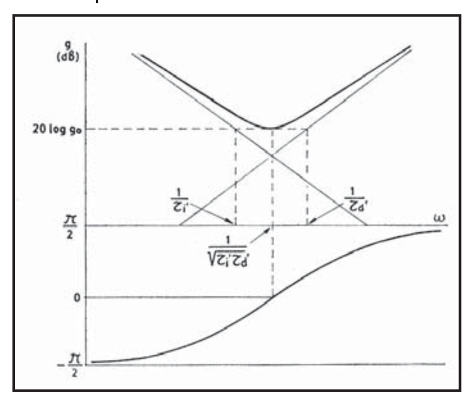


Figura A.21 Respuesta frecuencial del controlador PID

En la figura A.22 puede verse un resumen de los diagramas de Bode de los instrumentos, así como de los diagramas de Nyquist correspondientes.

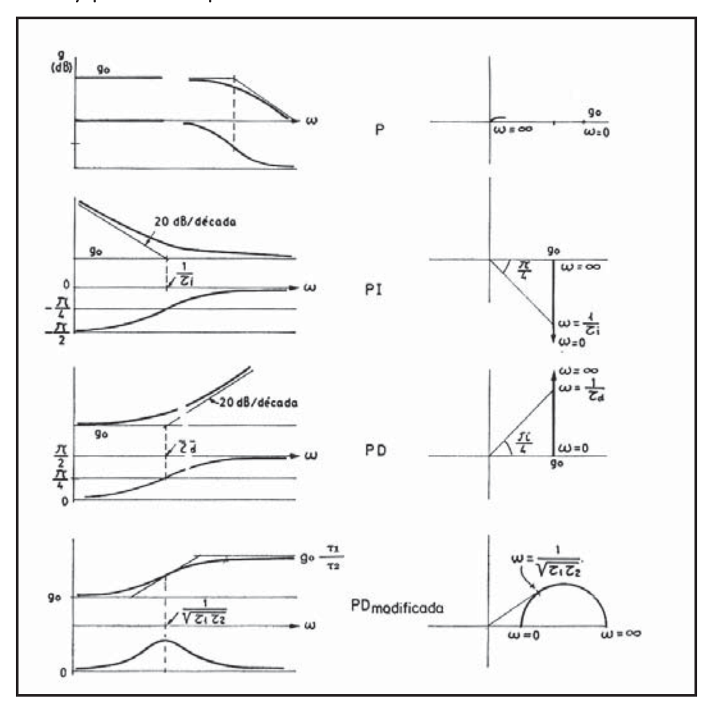


Figura A.22 Diagrama de Bode y de Nyquist de los instrumentos P, PI, PID

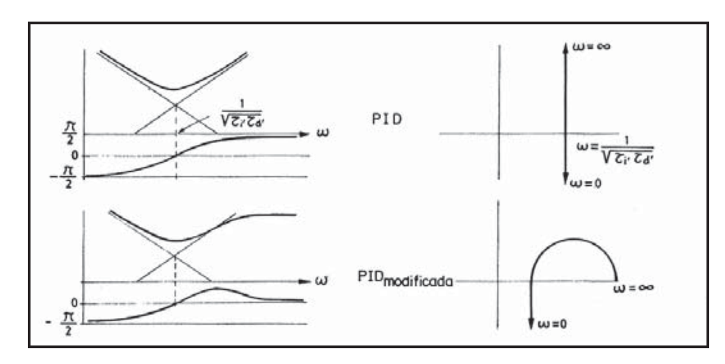


Figura A.22 continuación Diagrama de Bode y de Nyquist de los instrumentos P, PI, PID

A.4.6 Control PID en el diagrama de Nyquist

Veamos la respuesta frecuencial de los controladores representada en el diagrama de Nyquist. Sea:

P = Función de transferencia del controlador de acción proporcional de ganancia G_0.

C = Función de transferencia del controlador de ganancia 1.

Veamos la deducción del producto de estas funciones de transferencia en el diagrama de Nyquist.

El producto de las funciones de transferencia del controlador de acción proporcional P y del controlador I (con ganancia proporcional igual a 1) en el diagrama de Nyquist es:

$$PI = P\left(1 + \frac{1}{jw\tau_i}\right) = P\left(1 - j\frac{1}{w\tau_i}\right) = PC_1$$

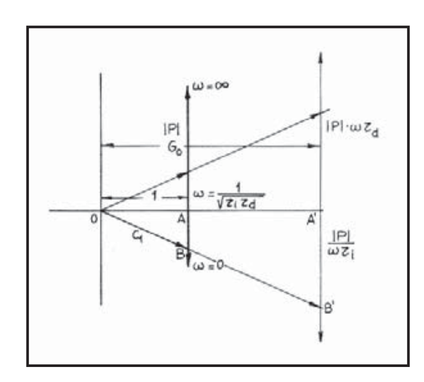


Figura A.23 Respuesta frecuencial en el diagrama de Nyquist

El vector P es $\overline{OA}$ y el C_1 es $\overline{OB}$ y están representados en la figura A.23. Evidentemente, su producto es el producto de módulos y su argumento la suma de argumentos. Por tanto, el módulo resultante puede determinarse en la figura A.23 por semejanza de los triángulos OAB y $OA'B'$. De esta semejanza se deduce:

$$\frac{OA}{OA'} = \frac{AB}{A'B'}$$

Es decir:

$$\frac{1}{|P|}=\frac{1/w\tau_i}{A'B'}$$

De donde:

$$A'B'=|P|\frac{1}{w\tau_i}$$

$$OB'=\sqrt{|P|^2+\frac{|P|^2}{w^2\tau_i^{\,2}}}=P\sqrt{1+\frac{1}{w^2\tau_i^{\,2}}}=|P||C_1|$$

Por tanto, el vector PC_1 tendrá por módulo el vector hipotenusa del triángulo formado por el vector P y con el ángulo en el origen O trazado a partir de P. Como C_1 es el vector de acción integral con ganancia proporcional 1, para pasar a PI bastará multiplicar por el vector de ganancia proporcional G_0 constante para todas las frecuencias y con argumento 0 correspondiente a la acción proporcional. Se obtendrá así el vector $PI = \overline{OB'}$ del controlador proporcional + integral.

En forma análoga se procede en el caso de la función de transferencia *PD*, según puede verse en la misma figura A.23. Se verifica:

$$\overline{PC}=\overline{P}\times 1\times\overline{(1+jw\tau_d)}=\overline{P}+\overline{P}\times 1\times jw\tau_d$$

Habiendo considerado la ganancia igual a la unidad.

En el caso de un controlador *PID*, la función de transferencia *PC* vale:

$$\overline{PC}=\overline{P}\times 1\times\overline{\left(1+\frac{1}{jw\tau_i}+jw\tau_d\right)}=\overline{P}+\overline{P}\times 1\times\overline{\left(jw\tau_d-j\frac{1}{w\tau_i}\right)}=$$

$$=\overline{P}-\overline{P}\times 1\times j\frac{1}{w\tau_i}+\overline{P}\times 1\times\overline{jw\tau_d}$$

Y puede verse su determinación en la figura A.23, en la que debe señalarse que la magnitud relativa de la acción integral con relación a la derivada dependerá de la magnitud de $w\tau_d$ y $1/w\tau_i$. El punto de corte de ambas curvas vendrá dado por la frecuencia $w = 1/\tau_i\tau_d$.

A.4.7 Ensayo de controladores

Existen varias normas que establecen los ensayos a realizar para averiguar las respuestas indicial y frecuencial del instrumento.

Entre las mismas figuran:

- *ISA RP26.1-1957* y *RP 26.2-1960* de la Sociedad de Instrumentos Americana ISA sobre generación eléctrica o neumática de las señales de entrada.
- *ISO/TC 124/WG 3 (Secretariat 13) 21 E Nov. 1970* sobre métodos de evaluación de controladores con señales analógicas.

- *BS 4150: 1967* sobre métodos de evaluación de controladores neumáticos con señales de entrada, consigna y salida de 3-15 psi.
- *IEC-546 (1987) Controladores con Señales Analógicas para Uso en Sistemas de Control de Procesos Industriales*.
- *Standard ISA-S26-1968 Dynamic Response Testing of Process Control Instrumentation*.
- *ISA-RP55.1-1975 (R 1983) Hardware Testing of Digital Process Computers.*
- *ISO/IEC 17025. (2005) General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.*

El equipo de ensayo general que recomiendan está representado en la figura A.24.

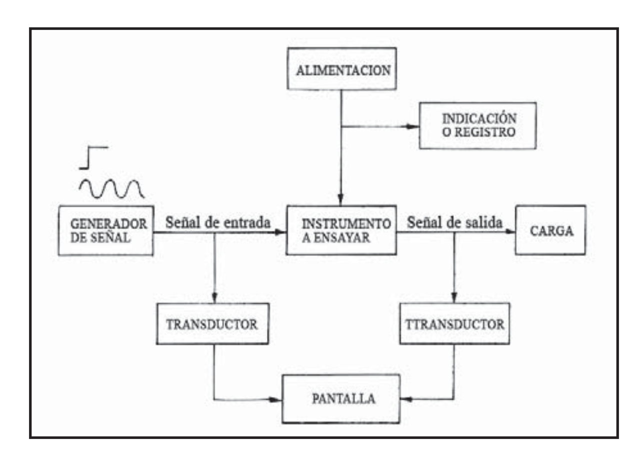
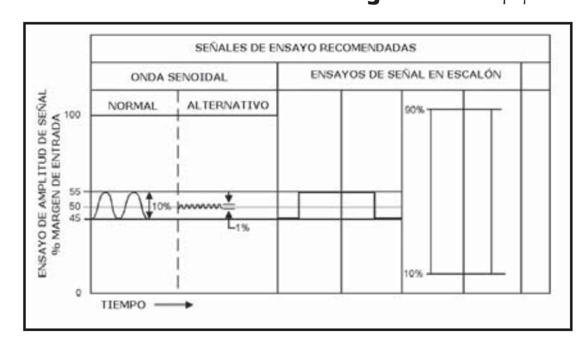


Figura A.24 Equipo de ensayo dinámico



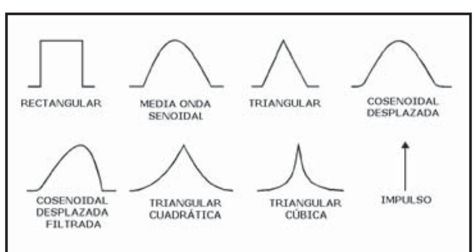


Figura A.25 Señales de ensayo recomendadas

En el equipo de ensayo se emplean sistemas generadores eléctricos de las señales, equipos registradores de alta velocidad que registran en el mismo eje de tiempos las señales de entrada, en escalón o senoidal según se trate de obtener la respuesta indicial o frecuencial, y las de salida. La relación de magnitudes se obtiene comparando las crestas, y el desfase midiendo el desplazamiento relativo de ambas curvas y pasándolo a grados. Otros parámetros que se miden en los controladores son los siguientes:

- Error medio, histéresis, linealidad y repetibilidad de la indicación de la variable y de la del punto de consigna en todo el campo de medida del instrumento.

- Consumo de aire (o potencia en caso de instrumentos electrónicos o digitales).
- Saltos en la señal de salida en la conmutación automático-manual o manual-automático.
- Errores en el dial de BP, BI, BD.
- Ensayo de vida útil acelerada del instrumento.

Influencia de:

- Variaciones de la temperatura ambiente.
- Variaciones en la presión del aire de alimentación (o en la tensión de alimentación en instrumentos electrónicos).
- Sobrecarga en la señal de entrada. Posición y ángulo de montaje. Caídas. Vibraciones.
- Interrupción durante largos períodos del aire de alimentación (o de la tensión de alimentación en instrumentos electrónicos o digitales).

La determinación de estos parámetros requiere la observación de normas de evaluación y el seguimiento de métodos de ensayo de los controladores utilizando bancos de ensayo dotados con instrumentos de gran precisión, cuya adquisición no está normalmente al alcance del usuario de instrumentación. Existen organismos reconocidos internacionalmente que realizan estas pruebas y emiten un informe de evaluación a requerimiento del fabricante de los instrumentos, usualmente cuando éste lanza al mercado un nuevo modelo. De este modo, colabora en la planificación y organización de los programas de evaluación de instrumentos.

Entre estos organismos se encuentran:

- SIREP-WIB-EXERA reconocidos por *European Organisation for Testing and Certification* (EOTC) como el *Agreement Group for International Instrumentation Evaluation*
- EI (*Evaluation International*) antes SIREP (*International Instrument User's Association*)
  East Mailing Enterprise Centre New Road, East Mailing, ME19 6BJ
  Reino Unido
  www.evaluation-international.com
- WIB (Working Party on Instrument Behaviour)
  Prinsessegracht 26, 2514 AP The Hague
  Holanda
  www.wib.nl
- Asociación europea de soporte a los usuarios de la automatización – EXERA y CLUI.
- EXERA (*Association des exploitants d'equipements, de mesure, de regulation et d'automatisme*)
  4 Citè d'Hauteville
  75010 París - Francia
  www.exera.com
- CLUI (*Club Utilizzatori Italiani*)
  Via Trionfale 6812
  00135 Roma- Italia
- EWE (*International Instrument User's Association*)
  Asociación unión de SIREP, WIB y EXERA

- TNO - *Organization for Applied Scientific Research* (Organización para Investigación Científica Aplicada) que dispone del Centro de Evaluación de Instrumentación y Técnicas de Seguridad (TNO-EIB)

  Schoenmakerstraat 97, 2628 VK Delft, Holanda.

A.5 Iniciación a la optimización de procesos

A.5.1 Generalidades

El análisis armónico realizado en los controladores estudiados *P*, *PI* y *PID* permite, previo el conocimiento del proceso a controlar, acoplar los instrumentos de tal modo que el sistema sea óptimamente estable.

El proceso, desde el punto de vista de este estudio, se considera formado por el proceso en sí, el transmisor y la válvula o elemento final de control. De este modo, las señales de entrada y de salida del controlador son señales estándar neumáticas o eléctricas o digitales que pueden manipularse cómodamente desde el panel, donde generalmente estará situado el instrumento controlador.

La optimización del proceso requiere, pues, un conocimiento de sus características estáticas y dinámicas que puede adquirirse analítica o experimentalmente. El conocimiento analítico del proceso es muy difícil, laborioso y requiere, generalmente, del empleo de un computador.

El conocimiento experimental del proceso puede llevarse a cabo, considerándolo como un recinto cerrado o "caja negra" en el que se introducen señales adecuadas y se analizan las respuestas obtenidas en la salida.

Supondremos que el proceso es lineal, es decir, que perturbaciones distintas producirán respuestas proporcionales a las mismas. De este modo, es fácil predecir la respuesta de un sistema a cualquier perturbación; bastará sumar las respuestas elementales.

A.5.2 Análisis experimental del proceso

La respuesta indicial, ante una entrada en escalón, es la más conveniente para el análisis del proceso y se obtiene pasando el controlador a manual y cambiando bruscamente la posición de la válvula de control.

La mayor parte de los procesos se aproximan a los siguientes modelos de funciones de transferencia:

a) Elemento de primer orden y un retardo con la función de transferencia combinada:

$$W = g_0 \frac{e^{-sD}}{1 + s\tau_1}$$

en la que:

W= función de transferencia del proceso

g_0 = ganancia estática del proceso

D = retardo de velocidad

τ_1 = constante de tiempo de elemento de primer orden

La aplicación de un escalón al proceso dará lugar a una respuesta, según la figura A.23. El lector podría deducirla fácilmente determinando matemáticamente la antitransformada de Laplace de la función de transferencia dividida por s, es decir, de:

$$L^{-1}\left[\frac{W}{s}\right]$$

Y encontraría los valores para $t = D$, $t = D + \tau$, $t = \infty$ que permiten construir la curva de respuesta. Obtenida esta curva experimentalmente en el proceso, será posible deducir las constantes del mismo.

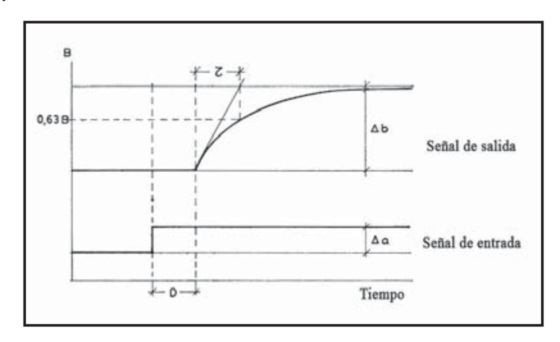


Figura A.26 Respuesta indicial de un proceso formado por un elemento de primer orden y un retardo puro

En la curva obtenida se traza cuidadosamente una tangente en el punto de inflexión. La ganancia estática g_0 se determinará por el cociente entre Δb e Δa, o sea:

$$g_0 = \frac{\Delta b}{\Delta a}$$

El retardo de velocidad será D y la constante de tiempo del elemento de primer orden será τ_1.

La figura A.26 corresponde a un retardo puro y la A.27a a un retardo normal compuesto por un retardo puro y pequeñas constantes de tiempo, caso que lógicamente se presenta más en la práctica.

b) Dos elementos de primer orden y un retardo con la función de transferencia combinada:

$$W = \frac{g_0 e^{-sD}}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2)}$$

La respuesta indicial puede verse en la figura A.27. En esta figura, trazada la tangente en el punto de inflexión se deducen los valores:

$$g_0 = \frac{\Delta b}{\Delta a}$$

Y en primera aproximación:

$$\tau = \tau'_1$$
$$D = D'$$

Despreciándose la segunda constante de tiempo y aproximándose el proceso a un elemento de primer orden y un retardo según la figura A.27.

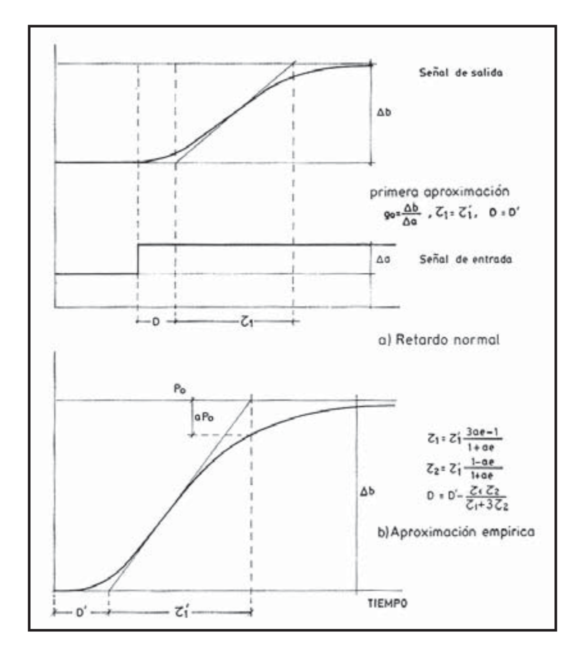


Figura A.27 Respuesta indicial de un proceso formado por dos elementos de primer orden y un retardo

Si se desea mayor aproximación se aplican las fórmulas empíricas siguientes:

$$\tau_1 = \tau'_1 \frac{3ae-1}{1+ae} \quad \tau_2 = \tau'_1 \frac{1-ae}{1+ae} \quad D = D' - \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + 3\tau_2}$$

En las que e = 2,72 y a es el porcentaje de P_0 que equivale al segmento diferencia entre P_0 y el valor de la curva en el tiempo $D' + \tau'_1$.

Para la obtención de las curvas de respuesta puede utilizarse un registrador de tamaño estándar, o bien un ordenador con placas de entrada y salida de datos. En este último caso existen programas de software que, aparte de seleccionar los parámetros de registro, permiten identificar los parámetros del proceso, en particular si éste es de primer orden con retardo puro. Basta aplicar al proceso una señal de entrada en escalón, con el controlador en manual, para que el programa almacene los datos de entrada y de salida del proceso y calcule los parámetros del modelo correspondiente.

A.5.3 Estabilidad

El límite de estabilidad de un bucle de control formado por el proceso (proceso en sí + transmisor + válvula de control) y el controlador viene definido por una oscilación automantenida en la cual el bucle de control responde ante cualquier perturbación con una oscilación estable, sin que estas oscilaciones varíen de amplitud.

A.5.4 Criterios de ajuste en el diagrama de Bode

La condición crítica para que se produzca esta oscilación continua es que la respuesta frecuencial del bucle de control en el diagrama de Bode sea tal que la ganancia total en dB sea cero y el desfase sea de 180°.

En la figura A.28 puede verse esta condición. No obstante, el criterio anterior sólo define la estabilidad absoluta sin indicar cuál es el grado de estabilidad. Sabemos que el bucle de control está optimizado cuando, ante una perturbación, el sistema responde con una curva de amortiguación con razón 1/4, es decir, que las amplitudes decrecen con esta relación (figura A.29).

Esta curva se obtiene si, en el diagrama de Bode, la curva de ganancia total cruza la línea de 0 dB para el valor de -140° del desfase, y es inferior en 5 dB para el valor de -180° del desfase. Por lo tanto, el proceso será estable si las curvas de ganancia y de desfase son inferiores a estos valores (figura A.28); es decir, el margen de ganancia no debe ser menor de 5 dB y el margen de fase no debe ser menor de 40°. Sin embargo, también pueden admitirse márgenes de ganancia entre 6 dB a 20 dB y márgenes de fase entre 25° y 60°. Para estos valores se obtienen curvas de respuesta que se apartan ligeramente de la curva de amortiguación 1/4.

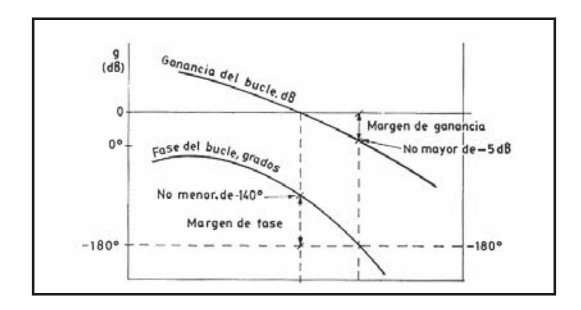


Figura A.28 Condición de estabilidad en el diagrama de Bode

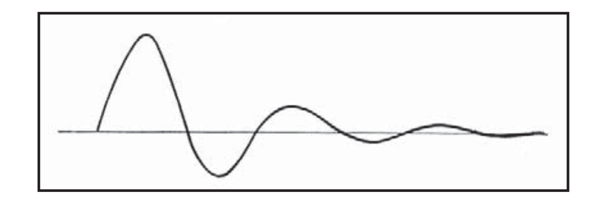


Figura A.29 Curva de amortiguación 1/4

La marcha a seguir, para el ajuste de las acciones *P*, *PI* o *PID* del controlador, para que la curva de respuesta del lazo tenga una amortiguación de 1/4 es la siguiente: la acción derivada se determina de acuerdo con la figura A.30. La acción derivada permite obtener el máximo efecto de estabilidad a frecuencias elevadas, desplazando la frecuencia de -180° para que la acción sea lo más rápida posible y para que el sistema corrija algunas perturbaciones rápidas sin que se produzca inestabilidad.

Este desplazamiento permite que la respuesta transitoria ante una perturbación sea más rápida (lo que puede verse en la curva de fase) o más estable.

La conveniencia de la acción derivada puede verse mediante dos criterios aplicados a la curva de fase:

1º criterio

El cociente de frecuencias f_{-270} / f_{-180} indica:

Si $0 < \dfrac{f_{-270}}{f_{-180}} < 2$ la acción derivada no es útil

Si $2 < \dfrac{f_{-270}}{f_{-180}} < 5$ la acción derivada es útil

Si $5 < \dfrac{f_{-270}}{f_{-180}}$ la acción derivada es muy útil

En nuestro caso, este cociente vale 15,5/ = 3,1, es decir, convendrá el empleo de la acción derivada.

2º criterio

La diferencia en dB entre el extremo de baja frecuencia y el valor correspondiente a -180° en la curva de ganancia indica:

Si la diferencia en dB < 5 dB, la acción derivada no es útil

Si 5 dB < diferencia en dB < 20 dB, la acción derivada es muy útil

Si 20 dB < diferencia en dB, la acción derivada es útil, pero puede ser innecesaria

En el ejemplo esta diferencia vale 15 dB.

Señalemos que este criterio es válido si el tiempo muerto del proceso es pequeño.

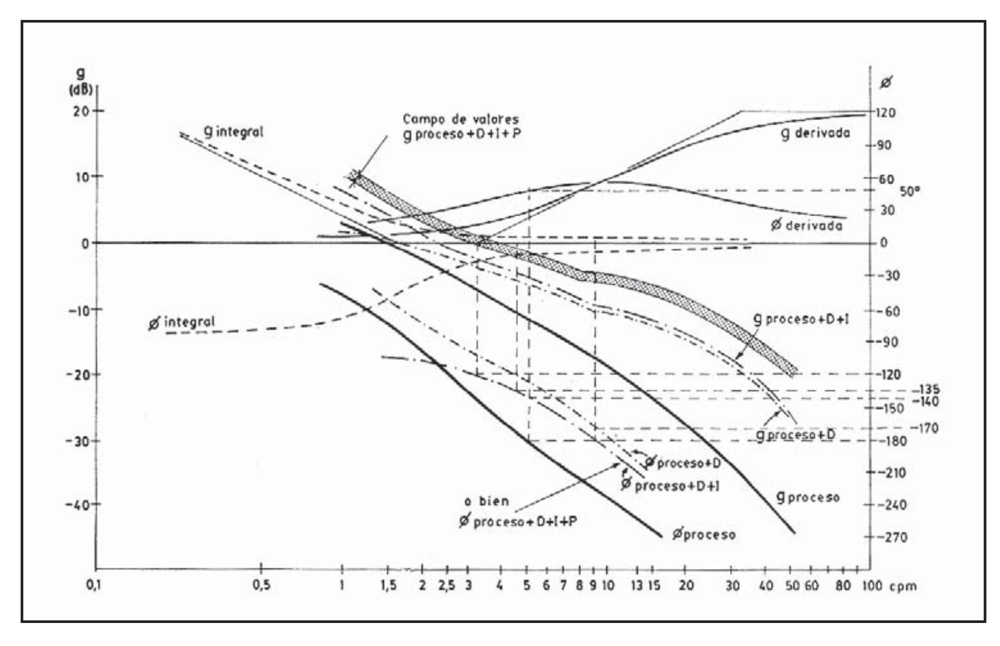


Figura A.30 Diagrama de Bode proceso + controlador

Utilizando pues acción derivada, el valor del tiempo de acción derivada estará comprendido probablemente entre:

$$\frac{Periodo\ limite\ (P_0)}{2} \text{ y } \frac{Periodo\ limite\ (P_0)}{3}$$

Que en la figura son:

Frecuencia límite (f_u) = 5 cpm

P_u = 1/5 = 0,2 minutos

0,06 < τ_d < 0,1 minutos

Consideraremos una acción derivada modificada.

A la frecuencia correspondiente a -180° de la curva de fase del proceso se coloca el punto 50° de la curva de fase de la acción derivada que se espera tener, es decir, deducida de las curvas facilitadas por los fabricantes o de un valor determinado de $m = \tau_2 / \tau_1$ facilitado también por ellos. Supondremos m = 0,1. Con estos datos pueden dibujarse las curvas de ganancia y de fase.

$$m = 0{,}1 = \frac{\tau_2}{\tau_1} \qquad \tau_1 = 0{,}05 \qquad tg\ 50^o = \frac{2\pi \times 5(\tau_1 - \tau_2)}{1 + 25\ \tau_1\tau_2} \qquad \tau_2 = 0{,}005$$

En la curva de ganancia, los dos puntos de intersección de las dos asíntotas con la tangente en el punto de inflexión son:

$$\frac{1}{\tau_1} \times \frac{1}{2\pi} = 3{,}2\ cpm \qquad \frac{1}{\tau_2} \times \frac{1}{2\pi} = 32\ cpm$$

Y, con las ecuaciones:

$$g = 20 \log g_0 \sqrt{\frac{1 + w^2\tau_1^{\ 2}}{1 + w^2\tau_2^{\ 2}}}$$

$$\phi = arc\ tg\ \frac{w\tau_1 - w\tau_2}{1 + w^2\tau_1\tau_2}$$

Pueden determinarse otros puntos. El máximo de la curva de fase corresponde a la frecuencia:

$$\frac{1}{\sqrt{\tau_1\tau_2}} \times \frac{1}{2\pi} = 10\ cpm$$

Con:

$$\phi = arc\ tg\ \frac{\tau_1 - \tau_2}{2\sqrt{\tau_1\tau_2}} = 55^o$$

Y la ganancia correspondiente g = 9,9 dB.

Si se dispusiera de las curvas facilitadas por los fabricantes, éstas se trasladan de modo que el punto 50° de la curva derivada (la fase) tenga la misma frecuencia que el punto -180° de la curva de fase del proceso.

De este modo, se determina el valor de 3,2 cpm como punto de intersección de la tangente en el punto de inflexión con la asíntota de ganancia 0 dB.

Así, pues, el tiempo de acción derivada es 0,05 minutos.

La suma de las dos curvas proporciona la fase total del lazo de control en la que puede verse que la frecuencia correspondiente a -180° es mayor que antes, con lo cual se ha mejorado la estabilidad (10 cpm en lugar de 5 cpm).

El ajuste de la acción integral se determina del modo siguiente:

Se coloca la curva de fase de la acción integral de modo que retarde en 10° la curva de fase total (proceso + controlador). Este valor experimental no afecta seriamente el límite de estabilidad de -180° y proporciona una alta ganancia a frecuencias intermedias. Así pues se coloca la curva de fase de integral de tal modo que proporciona un retardo de 10° en la curva de fase total (proceso + acción derivada). El punto de fase obtenido -10° a 9 cpm permite dibujar la curva de fase integral ya que en la acción integral:

$$\phi = arc\ tg\left(-\frac{1}{w\tau_i}\right) = -10^{o}$$

$$tg\left(-10^{o}\right) = -\frac{1}{2\pi 9\tau_i}$$

τ_i = 0,1 minutos/repetición (10 rep/minuto)

La frecuencia correspondiente a $-\pi/4$ es $\frac{1}{2\pi\ \tau_i} = 1,6\ cpm$ (intersección de las asíntotas).

Ahora pueden sumarse las curvas del proceso + derivada con las curvas de ganancia y de fase de la acción integral y puede determinarse la acción proporcional conveniente.

Aplicando los criterios de amortiguación decreciente de razón 4 a 1, que pueden verse en la figura A.28, y que establecen los valores mínimos del margen de ganancia de 5 dB y del margen de fase de 40° con los valores tolerables:

Margen de ganancia: 5 a 10 dB

Margen de fase: 40° a 60°, con preferencia 45°

Y, teniendo en cuenta que la acción proporcional no cambia la curva de fase, y en cambio desplaza la curva de ganancia paralelamente a sí misma en los mismos dB, resulta lo que sigue.

Aplicando el primer criterio, el controlador admite 3,5 dB (relación de magnitudes G = 1,5), lo que representa una BP del 66%.

El segundo criterio establece una ganancia de:

5 dB (G = 1,78) con BP = 56% para un margen de fase de 40°

2,5 dB (G = 1,33) con BP = 75% para un margen de fase de 60°

4,5 dB (G = 1,68) con BP = 59% para un margen de fase de 45°

No puede admitirse la consideración de los márgenes de fase de 40° y de 45°, ya que están en contradicción con el resultado obtenido en el primer criterio.

Así pues, el ajuste final del controlador para que la curva de respuesta tenga una amortiguación de 0,25 puede escogerse con BP = 70%, τ_i = 0,1 minutos/repetición (10 rep/minuto) y τ_d = 0,05 minutos de anticipo.

Hay que señalar que, si la acción derivada inicial escogida no hubiera sido correcta, en algún punto de las operaciones efectuadas no se hubiera conseguido la estabilidad conveniente. Sería necesario efectuar otro tanteo.

El ordenador puede dibujar las curvas anteriores y obtener, automáticamente, los valores de las acciones *PID* para cumplir con los criterios de estabilidad relativa. En el programa correspondiente pueden incluirse las sentencias que condicionan la diferencia de 0 dB para -140° de desfase y de 5 dB para el valor de -180° de desfase entre las curvas de ganancia y desfase.

A.5.5 Criterios de ajuste en el diagrama de Nyquist

Otro método para determinar los ajustes de los instrumentos se basa en el diagrama de Nyquist, en el que puede representarse la respuesta frecuencial del bucle, definiendo cada punto de la curva un módulo y un argumento a una frecuencia determinada. En este diagrama, el límite de estabilidad que da lugar a una oscilación automantenida del bucle abierto de control (proceso + controlador) queda establecido por la regla siguiente:

«Recorriendo el diagrama de Nyquist desde w = 0 hasta w = ∞, el punto -1 debe quedar a la izquierda de la curva." A medida que la curva se aproxima al punto -1 (lo cual ocurre al aumentar la ganancia del controlador) la respuesta es cada vez menos amortiguada, pasa a oscilatoria al cruzar este valor y llega a amplificarse cuando lo rebasa. Es decir, el punto (-1, -1800) corresponde a la oscilación automantenida del proceso + controlador. Sea el diagrama de bloques de la figura A.31. La función de transferencia del bucle abierto es *PC*, siendo:

P = función de transferencia del conjunto válvula de control + proceso + transmisor

C = función de transferencia del controlador.

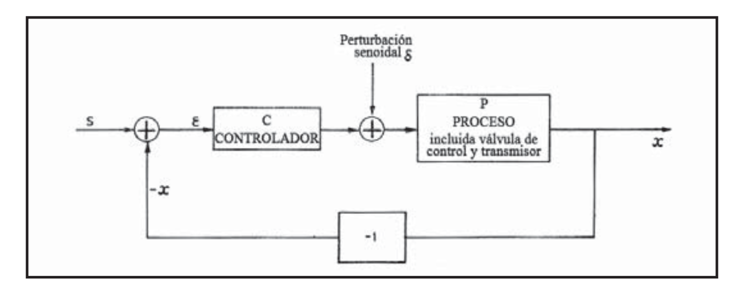


Figura A.31 Diagrama de bloques del proceso + controlador

Veamos la deducción del producto de estas funciones de transferencia en el diagrama de Nyquist.

El producto de las funciones de transferencia del proceso (P de la figura A.32a) y del controlador *PI* (figura A.32b con ganancia proporcional = 1) en el diagrama de Nyquist es:

$$\overline{PC} = \overline{P\left(1+\frac{1}{jw\tau_i}\right)} = \overline{P\left(1-j\frac{1}{w\tau_i}\right)} = PC_1$$

El vector P está representado en la figura A.32a y el C_1 en la figura A.32b. Evidentemente su producto es el producto de módulos y su argumento la suma de argumentos. Por lo tanto, el módulo resultante puede determinarse en la figura A.32b por semejanza de los triángulos OAB y $OA'B'$. De esta semejanza se deduce:

$$\frac{OA}{OA'} = \frac{AB}{A'B'}$$

Es decir:

$$\frac{1}{|P|} = \frac{1/w\tau_1}{A'B'}$$

De donde:

$$A'B' = |P|\frac{1}{w\tau_i} \text{ y } OB' = \sqrt{|P|^2 + \frac{|P|^2}{w^2\tau_i^{\,2}}} = |P|\sqrt{1+\frac{1}{w^2\tau_i^{\,2}}} = |P||C_1|$$

Por lo tanto, el vector $\overline{PC_1}$ tendrá por módulo el vector hipotenusa del triángulo formado por el vector $\overline{P}$ y con el ángulo ϕ en el origen O trazado a partir de P. Como C_1 es el vector de acción integral con ganancia proporcional 1, para pasar a $\overline{PC}$ bastará multiplicar por el vector de ganancia proporcional G_0 constante para todas las frecuencias y con argumento 0 correspondiente a la acción proporcional. Se obtendrá así el vector $\overline{PC}$ del conjunto proceso + controlador *PI* en bucle abierto (figura A.32d).

En forma análoga se procede en el caso de la función de transferencia *PD*, según puede verse en la figura A.32e. Se verifica:

$$\overline{PC} = \overline{P}\times\overline{1(1+jw\tau_d)} = \overline{P}+\overline{P}\times\overline{1\times jw\tau_d}$$

habiendo considerado la ganancia proporcional igual a la unidad. En el caso de un controlador *PID* la función de transferencia PC vale:

$$\overline{PC} = \overline{P}\times\overline{1\left(1+\frac{1}{jw\tau_i}+jw\tau_d\right)} = \overline{P}+\overline{P}\times\overline{1\left(jw\tau_d - j\frac{1}{w\tau_i}\right)} = \overline{P}-\overline{P}\times 1\times j\frac{1}{w\tau_i}+\overline{P}\times\overline{1\times jw\tau_d}$$

Y puede verse su determinación en la figura A.32f, en la que debe señalarse que la magnitud relativa de la acción integral con relación a la derivada dependerá de la magnitud de $w\tau_d$ y $1/w\tau_i$. El punto de corte de ambas curvas vendrá dado por la frecuencia:

$$w = \frac{1}{\sqrt{\tau_i\tau_d}}$$

Determinada la función de transferencia en bucle abierto PC en el diagrama de Nyquist falta aplicar los criterios de estabilidad correspondientes.

Estos criterios son equivalentes a los utilizados en el diagrama de Bode y pueden verse en la figura A.33.

Ganancia a -180° < -5 dB = 0,562

Margen de fase a 0 dB = 1 > -140°

a) Diagrama de Nyquist del proceso

b) Acción integral

c) Construcción Proceso+integral

d) Curva PI

e) Curva Proceso+acción derivada

f) Curva Proceso+acción PID

Figura A.32 Deducción del diagrama de Nyquist del proceso + controlador

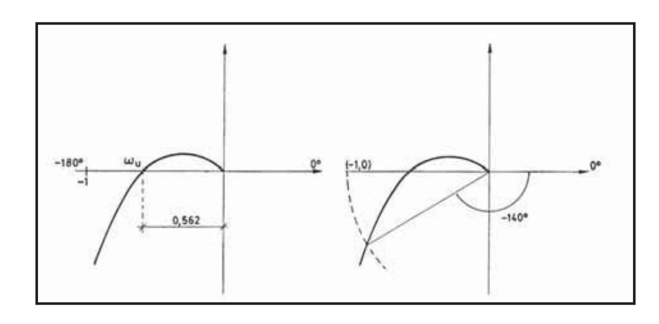


Figura A.33 Criterios de estabilidad en el diagrama de Nyquist

Para que la curva PC alcance estos valores es necesario tener en cuenta los puntos siguientes:

1. La ganancia a -180° debe ser aproximadamente 0,5 (frecuencia límite w_u). Cuando la ganancia es 1, la fase debe ser igual o superior a -140°.
2. A la frecuencia límite w_u, la acción integral debe retrasar la fase en un valor lo más pequeño posible, adoptándose un valor de compromiso de 10° que proporciona una ganancia máxima a frecuencias bajas y medias sin alterar demasiado la estabilidad a la frecuencia límite correspondiente a -180°.
3. La acción derivada debe desplazar la frecuencia límite w_u correspondiente a -180° a un valor lo más alto posible, pero no tan grande que se produzca inestabilidad a las frecuencias normales de trabajo. Se adopta el valor de compromiso de 50°.

En la figura A.32 puede verse el diagrama de Nyquist del proceso cuyo diagrama de bloques está representado en la figura A.31.

Los pasos a seguir para determinar los ajustes del instrumento son:

a) Ajuste de acción derivada

Aplicando los mismos criterios utilizados en el diagrama de Bode, se procede del modo siguiente: se aplica una acción derivada modificada mediante el mismo instrumento del ejemplo anterior, con m = 0,1 con la condición de que a 50° la frecuencia sea de 5 cpm (o sea, la correspondiente al ángulo de -180° del proceso), calculándose análogamente los valores de τ_1 y τ_2 ya deducidos:

τ_1 = 0,05 minutos τ_2 = 0,005 minutos

Puede dibujarse ahora la curva polar correspondiente (que también podría haber sido facilitada por el fabricante de los instrumentos), determinando varios valores según las ecuaciones:

$$G = \sqrt{\frac{1 + w^2 \tau_1^{\ 2}}{1 + w^2 \tau_2^{\ 2}}}$$

$$\phi = arc\ tg\ \frac{w\tau_1 - w\tau_2}{1 + w^2 \tau_1 \tau_2}$$

f	w	G	ϕ
0	0	1	0
1	6,28	1,04	15,6
1,5	9,4	1,1	22,5
2	12,5	1,18	28,4
2,5	15,7	1,27	33,6
3	18,8	1,37	37,8
5	31,4	1,86	48,5
8	50,3	2,62	54,1
11	69,1	3,4	54,8
16	100,5	4,6	52

f = cpm
w = radianes/minuto
G = relación amplitudes
ϕ = desfase

El valor máximo de ϕ corresponde a:

$$\phi = arc\ tg\ \frac{\tau_1 - \tau_2}{2\sqrt{\tau_1 \tau_2}} = 54,9^{\circ} \quad \text{y} \quad w = \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}} \times \frac{1}{2\pi} = 10\ cpm$$

Y el valor de la acción derivada es:

$$\frac{1}{\tau_1} \times \frac{1}{2\pi} = 3,2\ cpm$$

$$\tau_1 = 0,05\ minutos$$

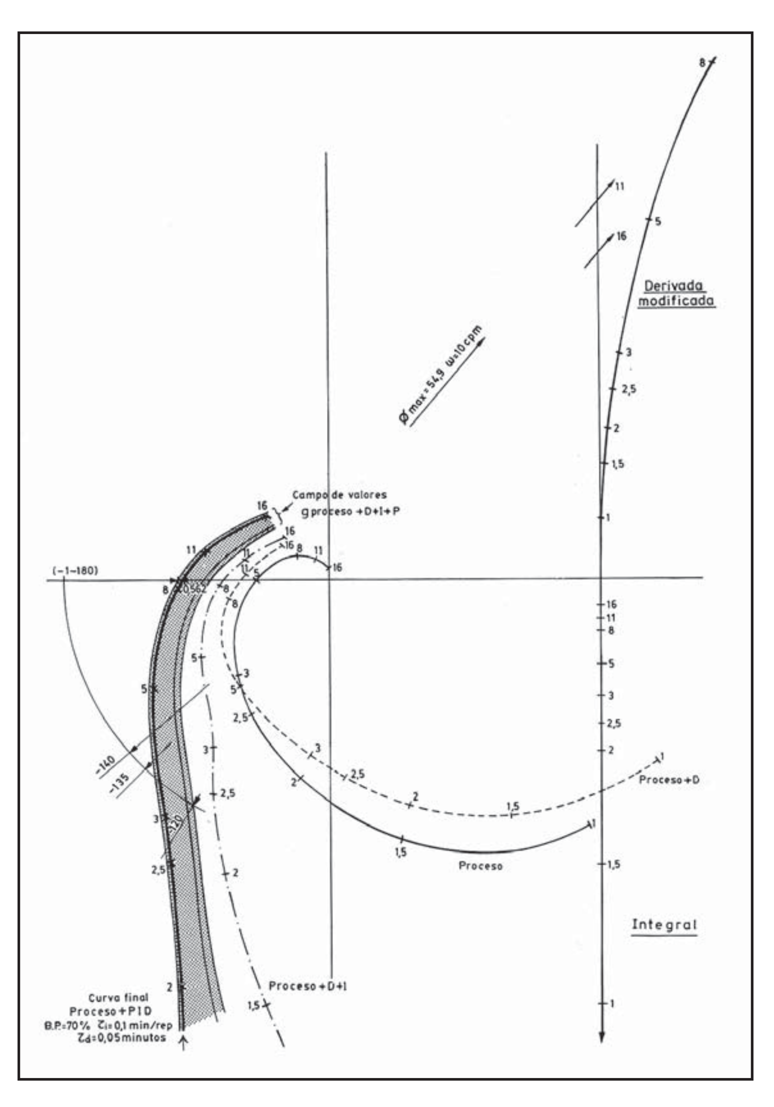


Figura A.34 Diagrama de Nyquist, proceso + controlador

Ahora pueden sumarse las curvas del proceso y de la acción derivada y se comprueba que se ha mejorado la estabilidad, ya que la frecuencia correspondiente a -180° es ahora de 10 cpm en lugar de 5 cpm como era antes.

b) Ajuste de acción integral

Se aplica la acción integral de modo que se obtenga en la fase un retardo de 10° a la frecuencia correspondiente a -180°. De este modo, se obtiene en la curva suma una f = 9 cpm a -180°. Luego aplicando la fórmula:

$$\phi = arc\ tg\left(-\frac{1}{w\tau_i}\right)$$

Se tiene:

$$-10 = arc\ tg\left(-\frac{1}{2\pi \times 9\tau_i}\right)$$ y τ_i = 0,1 minutos/repetición (10 rep/minuto)

Para obtener la curva resultante puede confeccionarse la siguiente tabla basada en las fórmulas de la acción integral:

$$G = \sqrt{1 + \frac{1}{w^2 \tau_i^{\,2}}}$$

$$\phi = arc\ tg\left(-\frac{1}{w\tau_i}\right)$$

f	w	G	ϕ
0	0	1	-90
1	6,28	1,9	-58
1,5	9,4	1,46	-46,7
2	12,5	1,28	-38,6
2,5	15,7	1,18	-32,5
3	18,8	1,09	-28
5	31,4	1,05	-17,6
8	50,3	1,02	-11,2
11	69,1	1,01	-8,2
16	100,5	1,005	-5,7

f = cpm
w = radianes/minuto
G = relación amplitudes
ϕ = desfase

Ahora pueden sumarse las curvas proceso + derivada con la recta de acción integral.

c) Determinación de la acción proporcional

Para determinar la acción proporcional conveniente se multiplica la curva *PID* (proceso + acción integral + acción derivada) por el vector de ganancia constante y argumento cero de la

acción proporcional para llevar la curva al punto (-0,562, -180), o bien al punto (1, -140), si bien pueden adoptarse valores tolerables hasta (-0,316, -180) y (1, -120), (1, -135).

El criterio (-0,562, -180) da G = 1,44 y BP = 69%

Para (1, -140) se obtiene G = 1,66 y BP = 60%

Para (1, -135) se obtiene G = 1,61 y BP = 62%

Para (1, -120) resulta G = 1,16 y BP = 86%

Los valores finales escogidos son:

BP = 70%, τ_i = 0,1 min/rep y τ_d = 0,05 minutos

Hasta ahora se han examinado los criterios de estabilidad considerando la función de transferencia en bucle abierto, es decir, el controlador en manual sin que la señal de salida del bloque del proceso (procedente del transmisor) se compare con el punto de consigna del controlador. De esta comparación se genera la señal de error que alimenta el controlador, circulando así ésta y cerrándose el bucle de control. Como la señal va recirculando continuamente pueden presentarse oscilaciones y es posible que ocurra inestabilidad.

En el bucle abierto, una perturbación cíclica producirá una variable de salida del proceso, también, cíclica que dependerá de la frecuencia de la perturbación.

En el bucle cerrado, como la válvula de control es reajustada continuamente por el controlador, una perturbación cíclica producirá una desviación, también cíclica, entre la variable y el punto de consigna, pero como esta desviación se presenta a la entrada del controlador, y se cierra a través del bucle de control, el sistema se comportará con una respuesta en desviación distinta de la del bucle abierto. La diferencia entre estas dos curvas de respuesta representará la eficacia del controlador en la anulación de las señales de desviación debidas a señales perturbadoras.

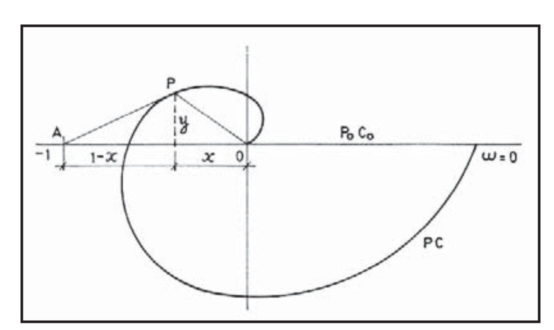


Figura A.35 Curva PC de función de transferencia en bucle abierto

La curva de respuesta en bucle cerrado del conjunto proceso + controlador puede obtenerse a partir del diagrama de Nyquist del bucle abierto de control (controlador + proceso). Si P es la función de transferencia del proceso y C la del controlador y consideramos la figura A.35 resulta como función de transferencia del bucle cerrado:

$$\text{Módulo } \left|\frac{x}{s}\right| = \left|\frac{PC}{1+PC}\right| \qquad \arg\frac{x}{s} = \arg PC - \arg(1+PC)$$

De este modo pueden determinarse varios puntos y obtener así, uniéndolos, la función de transferencia en bucle cerrado.

Sin embargo, el procedimiento es un poco laborioso, por lo cual se acude a utilizar los círculos *M* y *N* que son los lugares geométricos de los puntos de magnitud constante y de fase constante, respectivamente.

La construcción de estos círculos se efectúa del modo siguiente:

Sea P un punto de la curva PC de función de transferencia en bucle abierto de la figura A.35.

En el triángulo OPA se verifica:

$$\frac{OP}{AP} = m = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{\left(1 - x^2\right) + y^2}}$$

Expresión que desarrollada da:

$$m^2 + 2xm^2 + x^2m^2 + y^2m^2 = x^2 + y^2$$

$$x^2 + 2x\frac{m^2}{m^2 - 1} + y^2 + \frac{m^2}{m^2 - 1} = 0$$

$$\left(x + \frac{m^2}{m^2 - 1}\right)^2 + y^2 = \left(\frac{m}{m^2 - 1}\right)^2$$

Que es la ecuación de un círculo de radio $m/(m^2\text{-}1)$ y de centro ($-m^2/m^2$-1, 0) y corresponde al lugar geométrico de los puntos de magnitud constante $m = OP/AP$ en bucle cerrado (figura A.36a).

De forma análoga se deduciría el lugar geométrico de los puntos de fase constante en bucle cerrado partiendo de que esta fase vale [argumentos PC - argumento (1 + PC)].

Se determinaría una familia de círculos que pasan por los puntos 0 y -1 del eje real con centro de esta circunferencia en:

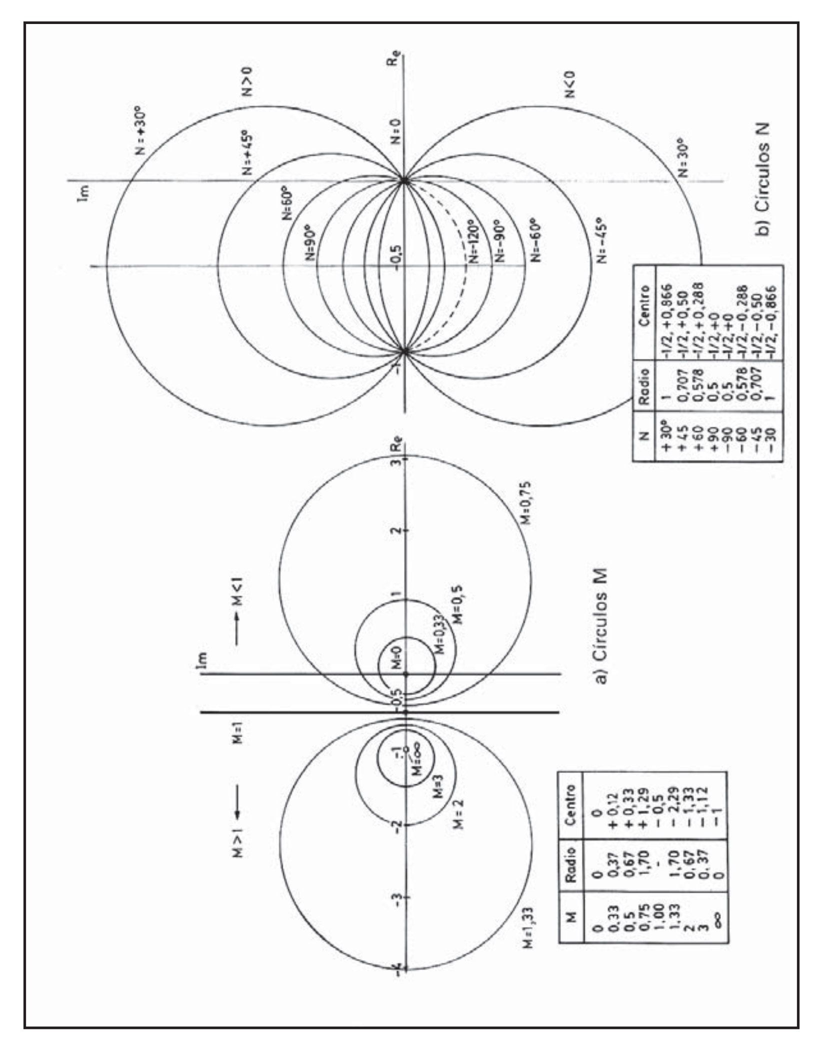
Centro: $\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\, ctg\left(\alpha - \beta\right)\right]$ y radio: $\frac{1}{2\; sen\left(\alpha - \beta\right)}$

En la figura A.36b pueden verse estos círculos cuyos puntos de corte con el diagrama de Nyquist proporcionan la amplitud y la fase en función de la frecuencia, por lo que permiten dibujar la curva de respuesta en lazo cerrado y representarla, si se desea, en el diagrama de Bode.

A.5.6 Ábaco de Nichols y curva de desviación

Hay que señalar que si el diagrama de Nyquist se representa en coordenadas cartesianas, en lugar de coordenadas polares, se obtiene el ábaco de Nichols.

En ordenadas se encuentra la amplitud en dB y en abscisas la fase para la respuesta en lazo abierto. Las curvas M y N se dibujan en el mismo diagrama y permiten obtener fácilmente la respuesta en lazo cerrado (figura A.37) observando las coordenadas correspondientes.



N	Radio	Centro
+ 30°	1	-1/2, +0,866
+ 45	0,707	-1/2, +0,50
+ 60	0,578	-1/2, +0,288
+ 90	0,5	-1/2, +0
− 90	0,5	-1/2, +0
− 60	0,578	-1/2, −0,288
− 45	0,707	-1/2, −0,50
− 30	1	-1/2, −0,866

M	Radio	Centro
0	0	0
0,33	0,37	+ 0,12
0,5	0,67	+ 0,33
0,75	1,70	+ 1,29
1,00	-	− 0,5
1,33	1,70	− 2,29
2	0,67	− 1,33
3	0,37	− 1,12
∞	0	− 1

Figura A.36 Círculos M y N

La comparación directa entre las respuestas en lazo abierto y lazo cerrado permite determinar la bondad del controlador en la eliminación de las perturbaciones en función de la frecuencia. Esta diferencia puede verse de forma manifiesta en las curvas llamadas de relación de desviación (*deviation ratio,* DR) que en ordenadas tienen:

$$DR = \frac{Amplitud\ de\ la\ desviacion\ en\ lazo\ cerrado\ (con\ control)}{Amplitud\ de\ la\ desviacion\ en\ lazo\ abierto\ (\sin\ control)}$$

Y, en abscisas, la frecuencia en escala logarítmica. Estas curvas pueden deducirse del diagrama de Bode o del ábaco de Nichols restando las ganancias en dB y pasando la diferencia a cociente de magnitudes ya que:

$$dB_c - dB_a = 20 \log \frac{G_c}{G_a}$$

$$\frac{G_c}{G_a} = \text{antilog}\frac{dB_c - dB_a}{20}$$

siendo dB_c, G_c y dB_a, G_a las ganancias (en dB) y magnitudes en lazos cerrado y abierto, respectivamente (ver tabla de la figura A.37). Otra forma de determinación parte del diagrama de Nyquist considerando, en la figura A.35 que DR vale:

$$\left|\frac{\frac{x}{s}}{PC}\right| = \left|\frac{\frac{PC}{1+PC}}{PC}\right| = \left|\frac{1}{1+PC}\right|$$

Es decir, que en la figura A.35 de la curva en lazo abierto del proceso + controlador (PC) se deducirá la curva DR, hallando el inverso del módulo del vector $\overline{AP} = \overline{1 + PC}$ para cada valor de la frecuencia.

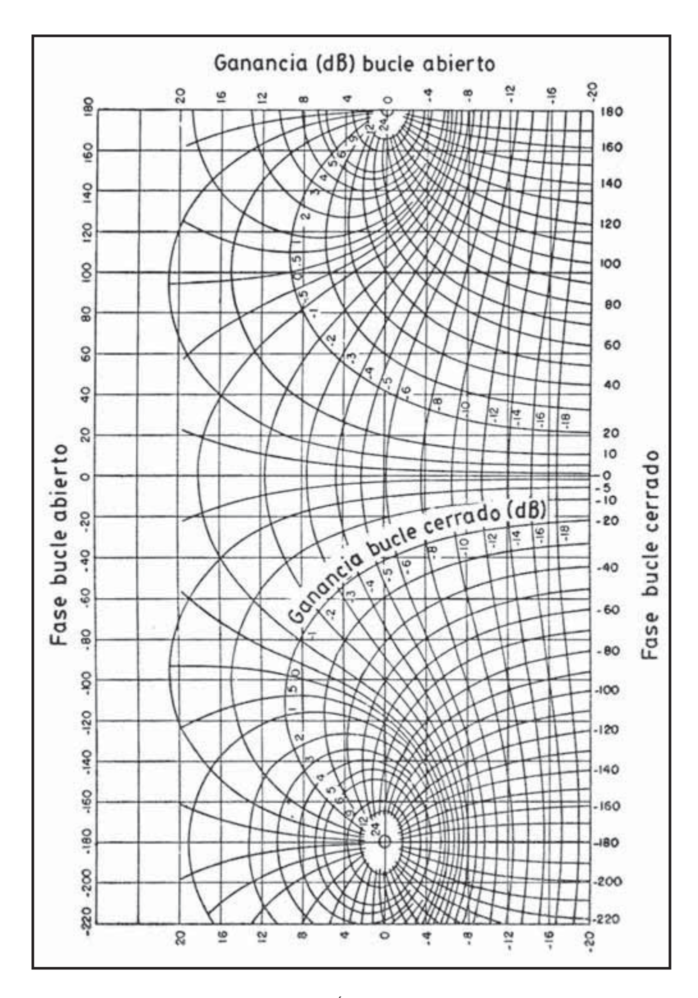


Figura A.37 Ábaco de Nichols

En la figura A.38 se representa una curva típica en la cual se observarán tres zonas separadas por la línea DR = 1.

En la zona A, el controlador reduce los efectos de las perturbaciones ya que el instrumento disminuye los picos de las desviaciones por debajo de lo que serían si se introdujera la señal fluctuante en el lazo y se permitiera, simplemente, que la variable medida oscilara. Cuanto mayor sea el campo de valores de frecuencia de la zona A tanto mayor será la bondad del controlador para un mayor campo de frecuencias. Cuanto más baja esté situada la curva dentro de la zona A tanto mejor será el controlador para reducir las desviaciones.

En la zona B, el controlador amplifica el tamaño de la desviación, exagerando los efectos de las perturbaciones, tanto más cuanto más alta sea la cresta de la curva.

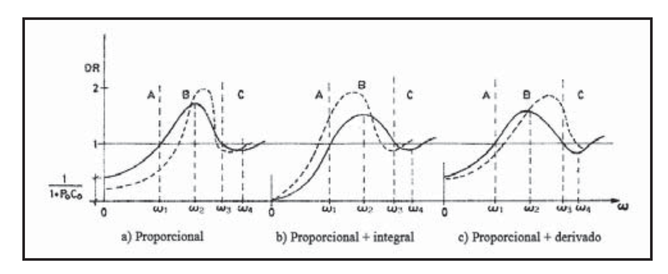


Figura A.38 Curva típica de relación de desviación

En la zona C el controlador se limita prácticamente a no influir en el tamaño de las desviaciones y no tiene ningún efecto sobre las mismas.

La curva de relación de desviación permite hacer las siguientes observaciones:

a) Un controlador con sólo acción proporcional tendrá un *offset* dado por la ordenada $1/(1+P_0C_0)$ correspondiente a frecuencia cero, ya que después de una perturbación, y manteniendo invariables las constantes del proceso, las condiciones de servicio son constantes y la frecuencia debe ser cero.

   El aumento de la ganancia (o disminución de la *BP*) reduce el *offset*, aumenta la zona A (w_1 mayor), disminuye la zona B (w_1 mayor, w_3 disminuye) y aumenta el pico de resonancia de la zona B.

b) Un controlador con acción proporcional e integral no tendrá *offset*. El aumento del tiempo de acción integral τ_i disminuye la zona A (w_1 menor), disminuye la zona B (w_3 menor) y aumenta el pico de resonancia de la zona B.

c) Un controlador con acción proporcional y derivada tiene un *offset* igual que el de un controlador proporcional. El aumento del tiempo de acción derivada aumenta la zona A (w_1 aumenta), aumenta la zona B (w_2 aumenta bastante) y aumenta el pico de resonancia.

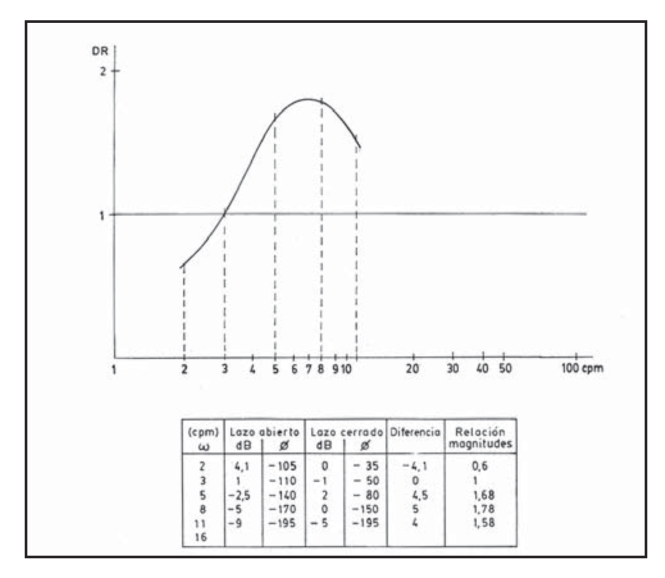
En la figura A.39 puede verse la representación de la curva de desviación del conjunto del proceso + controlador de la figura A.30.

Se han visto, pues, varios criterios de optimización basados en la obtención sucesiva de las siguientes funciones:

a) Función de transferencia del proceso obtenida analíticamente o bien por la respuesta indicial ante una entrada en escalón, y su representación en el diagrama de Bode o el de Nyquist.

b) Optimización del conjunto proceso + controlador para que el sistema responda con una curva de amortiguación de razón 1/4 mediante los métodos:
    1. Diagrama de Bode con el proceso + controlador en lazo abierto.
    2. Diagrama de Nyquist con el proceso + controlador en lazo abierto.

c) Comprobación de la estabilidad y su mejora mediante la obtención de la respuesta en lazo cerrado a partir de la de lazo abierto con alguno de los métodos siguientes:
    1. Diagrama de Nyquist y su intersección con los círculos M y N.
    2. Abaco de Nichols.



(cpm)	Lazo abierto		Lazo cerrado		Diferencia	Relación magnitudes
ω	dB	ø	dB	ø		
2	4,1	−105	0	− 35	−4,1	0,6
3	1	−110	−1	− 50	0	1
5	−2,5	−140	2	− 80	4,5	1,68
8	−5	−170	0	−150	5	1,78
11	−9	−195	− 5	−195	4	1,58
16						

Figura A.39 Curva de desviación PC

La comparación entre las dos curvas de respuesta en lazo abierto y lazo cerrado puede hacerse directamente o bien a través de la curva de relación de desviación. En estos criterios de optimización están basados los criterios clásicos de ajuste de los controladores.

a) *Método de tanteo*. Se ensaya por tanteo los ajustes idóneos del controlador para que el lazo cerrado, proceso + controlador, sea estable.

b) *Método de Ziegler & Nichols*. Se ensaya el lazo cerrado de control con sólo banda proporcional hasta obtener una oscilación continua y se aplican varias fórmulas empíricas según las acciones del controlador.

c) *Método de curva de reacción*. Se ensaya el proceso aislado en lazo abierto introduciendo una entrada en escalón. Se toman datos en la respuesta indicial correspondiente que, sustituidos en fórmulas adecuadas, permiten obtener los ajustes correspondientes del controlador. Este método parte, pues, del proceso y las fórmulas aplicadas representan la transformación de la función de transferencia de éste para que pase a la función de transferencia del conjunto proceso + controlador, necesaria para que la respuesta ante una perturbación sea amortiguada con un factor de 1/4.

Apéndice B
Evolución de la instrumentación

B.1 Inicios. Instrumentos locales y neumáticos

Los instrumentos de control fueron naciendo a medida que las exigencias del proceso lo impusieron. Las necesidades de la industria fueron (y son actualmente) el motor que puso en marcha la inventiva de los fabricantes, o de los propios usuarios, para idear y llevar a cabo la fabricación de los instrumentos convenientes para los procesos industriales.

El desarrollo se inició con los manómetros, termómetros y válvulas manuales localmente montadas. En esta fase, eran necesarios muchos operadores para observar los instrumentos y maniobrar las válvulas (figura B.1). Los procesos y los instrumentos eran proyectados empíricamente, basándose en la intuición y en la experiencia acumulada, y no estaban centralizados para conseguir una mayor eficiencia en las funciones del operador.

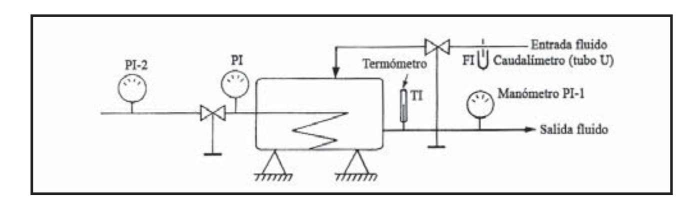


Figura B.1 Instrumentos locales

La siguiente etapa fue la centralización de las funciones de medida y de control más importantes, pertenecientes a una operación del proceso, en un panel localmente montado. De este modo, podía observarse y controlarse el funcionamiento de cada elemento particular de la instalación de una manera más coordinada y eficaz. Para hacerlo posible, se desarrollaron instrumentos galvanométricos operados por termopar, termómetros con largos capilares y caudalímetros con largos tubos de conducción de la presión diferencial (figura B.2).

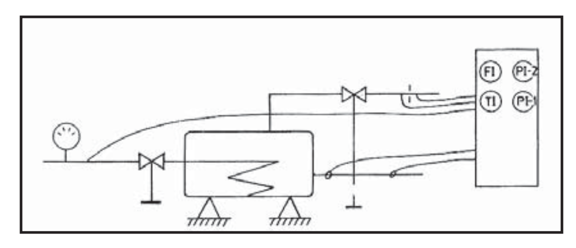


Figura B.2 Centralización en panel

Sin embargo, los procesos se hicieron más complejos y críticos, y llegó a hacerse necesario que los operadores observaran, simultáneamente, el funcionamiento de varias unidades de la instalación. El desarrollo de los transmisores neumáticos permitió la centralización de las funciones de medida y de regulación de toda una unidad del proceso en una sala de control, utilizándose como receptores los

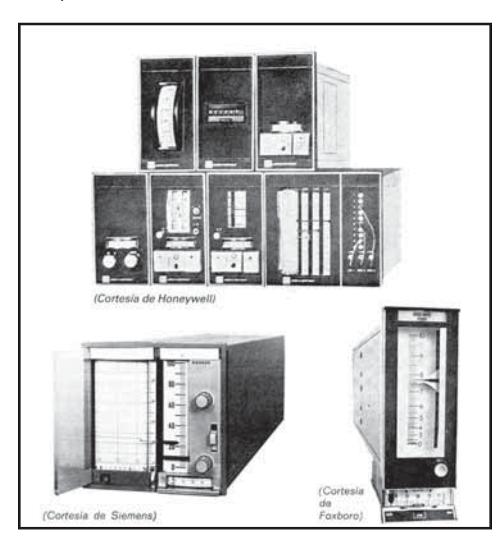
instrumentos registradores controladores neumáticos de caja grande que aparecieron hacia el año 1940. Estos instrumentos se perfeccionaron con un diseño modular hacia el año 1946, conservando la unidad automático-manual de 4 posiciones en un subpanel aparte.

A medida que pasó el tiempo, estas salas de control se hicieron indebidamente grandes, debido al crecimiento de los procesos y al tamaño de los instrumentos convencionales y se desarrolló la instrumentación neumática enminiatura, que apareció en el mercado hacia el año 1947, dotada ya con conmutación automático-manual incorporada, pero con el mismo tipo de transferencia.

B.2 Instrumentos electrónicos convencionales y de alta densidad

A principios de los años 50 aparecen los primeros instrumentos electrónicos a válvulas. Más tarde, se perfecciona la unidad automático-manual neumática, consiguiéndose el cambio en un solo paso, sin que se produzcan saltos en la señal de salida a la válvula y aparecen, paralelamente, los instrumentos electrónicos miniatura alrededor de los años 1960. El tamaño de estos instrumentos neumáticos y electrónicos es ya reducido, pero todavía experimentará una normalización posterior.

Los complejos de múltiples procesos empezaron a utilizar salas de control separadas y la coordinación y la comunicación entre los operadores, en estas salas de control, comenzaron a plantear algunos problemas. Además, se introdujeron equipos centrales de tratamiento de datos que requerían la disponibilidad de diversas señales de medida en un punto central.



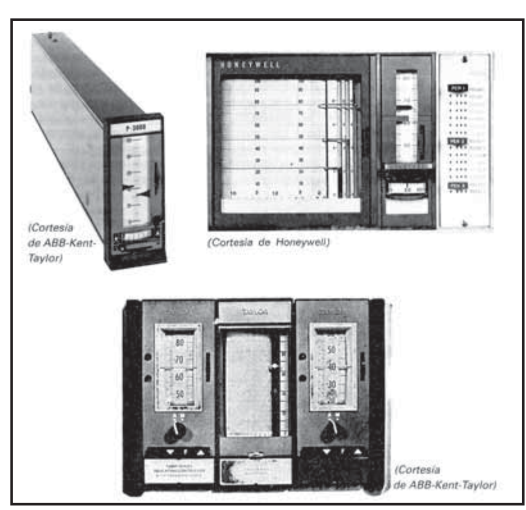


Figura B.3 Instrumentación de alta densidad

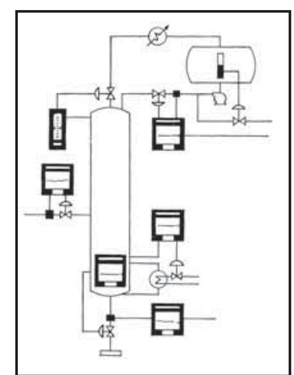
Los paneles de alta densidad permitieron, básicamente, que un operador supervisase un gran complejo compuesto por muchos procesos. Los sistemas de instrumentación de alta densidad (figura B.3) normalizaron sus dimensiones a 6 × 3" (150 × 75 mm) en indicadores controladores y 6 × 6" (150 × 150 mm) en registradores.

Disponían de un indicador de desviación con dos índices de distintos colores, el de la variable de color rojo o naranja y el del punto de consigna de color verde. Cuando no hay desviación, el índice

de color rojo o naranja no es visible en absoluto, y todo lo que se ve es una línea verde que se extiende a través de la fila de los controladores de indicación. Cualquier desviación que se presente en cualquier instrumento será fácilmente visible al destacar el índice rojo o naranja de la línea verde que mantienen los restantes instrumentos

Otro complemento de la información lo constituyen las lámparas señalizadoras incorporadas en los anunciadores de alarma que, ante una condición de alarma generada por un presostato, termostato, etc., centellea y hace sonar una bocina. Formas más complejas memorizan la secuencia de acontecimientos que conduce al paro parcial o total de la planta.

Habiendo adquirido rápidamente información sobre cualesquiera condiciones anormales, el operador tiene que decidir lo que piensa hacer. Necesita refrescar su memoria sobre el organigrama que cubre el proceso o los varios procesos que tiene asignados. La presentación inicial de información que se ideó fueron los *paneles gráficos* (figura B.4) en los que los instrumentos, los pulsadores y pilotos de bombas y las alarmas estaban dispuestos en el panel, siguiendo el trazado del proceso y colocados en su posición real. El problema que presentaba esta disposición era el excesivo espacio de panel ocupado y la imposibilidad de cambiar los instrumentos de lugar ante eventuales modificaciones o ampliaciones del proceso.



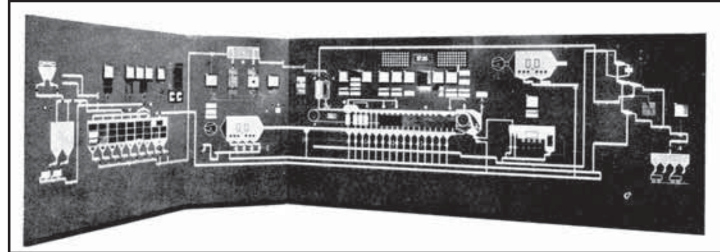


Figura B.4 Panel gráfico

Se solucionaron parcialmente estos problemas con los *paneles semigráficos* (figura B.5), donde los instrumentos se montan empotrados en filas de dos o cuatro a una altura conveniente para su manejo por parte del operador; los pulsadores y pilotos de bombas se encuentran en una fila más baja, las alarmas van montadas en la parte superior y sobre ellas, o a un nivel inferior, se encuentra un semigráfico, es decir, un diagrama del proceso con los instrumentos representados y codificados. De este modo, se aprovecha más el espacio del panel pero subsiste el inconveniente del semigráfico. Éste, si bien resulta útil en la puesta en marcha, más tarde se convierte en un elemento puramente decorativo que debe modificarse si cambia el proceso.

Por otro lado, la asignación al operador de uno o varios procesos complejos da lugar a un panel de dimensiones bastante considerables, lo que pone un límite a la capacidad de asimilación del operador y, al mismo tiempo, restringe la legibilidad de los detalles del proceso dibujados en el semigráfico. Para tener todavía información más detallada se presenta la información en la pantalla mediante un proyector de diapositivas de las que pueden seleccionarse 100 o más, dando partes diferentes del organigrama del proceso.

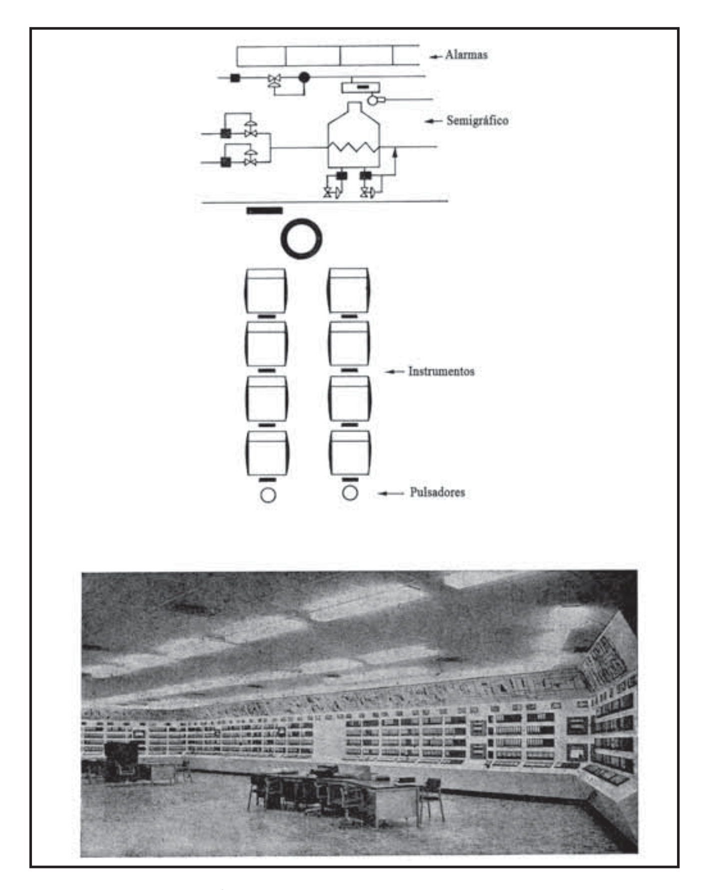


Figura B.5 *Panel semigráfico. Fuente: Control y Montajes Industriales CYMI, S.A.*

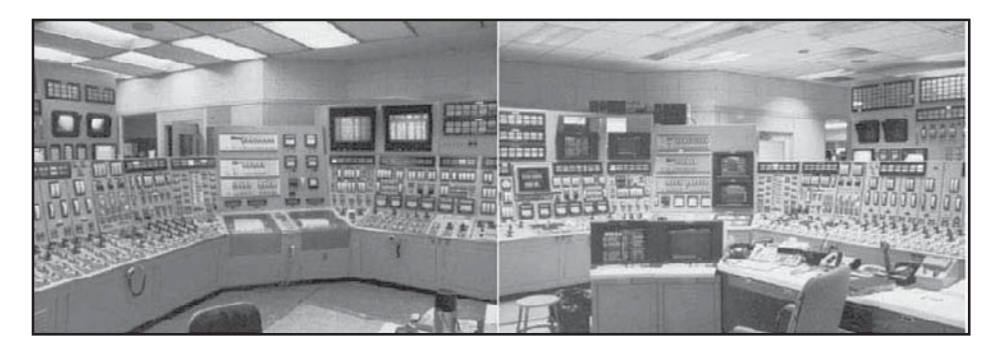


Figura B.6 *Paneles y consolas con muchos instrumentos. Fuente: Power Engineering International*

B.3 Computadores

Una vez desarrollados los instrumentos miniatura neumáticos y electrónicos, los procesos se fueron haciendo, poco a poco, mucho más complejos y su optimización llegó a ser una necesidad. En

esta etapa es donde empezaron a utilizarse los computadores. El primer computador electrónico apareció hacia el año 1946, pero los verdaderos computadores de proceso se desarrollaron realmente en los años 1960-1965 y se aplicaron principalmente en centrales térmicas, industrias metalúrgicas, químicas y petroquímicas. Permitieron optimizar y controlar las operaciones de la planta obteniendo productos de calidad alta y constante con ahorros importantes en el proceso, a pesar de su elevado coste.

Desarrollados los computadores y vistas las características de los instrumentos miniatura analógicos en paneles de alta densidad, los fabricantes, en colaboración con los usuarios de instrumentos, fueron buscando otras soluciones para que el operador no se viera desbordado por la necesidad de captar rápidamente una gran cantidad de información que le era necesaria para llevar a cabo un buen control. Evidentemente, le es difícil "dominar" un proceso complejo con una gran cantidad de instrumentos dispuestos en un panel de excesiva longitud.

La primera tendencia, que apareció en 1972 en el mercado, fue separar las partes de los instrumentos que realizaban las funciones auxiliares y de control analógico de las de indicación, registro o variaciones del punto de consigna que el operador debía efectuar. De este modo, el primer grupo pasó a una habitación aparte y fue dispuesto de forma modular para que fuera lo más accesible y lo más ventajoso posible para el personal de mantenimiento. El segundo grupo de instrumentos eran puramente aparatos receptores (indicadores y registradores) y otros con posibilidad de envío de señal de punto de consigna (controladores), montados en un panel en la sala de control a la vista del operador o del supervisor de proceso.

En la figura B.7 puede verse un esquema comparativo de los instrumentos miniatura electrónicos integrales y los de funciones separadas.

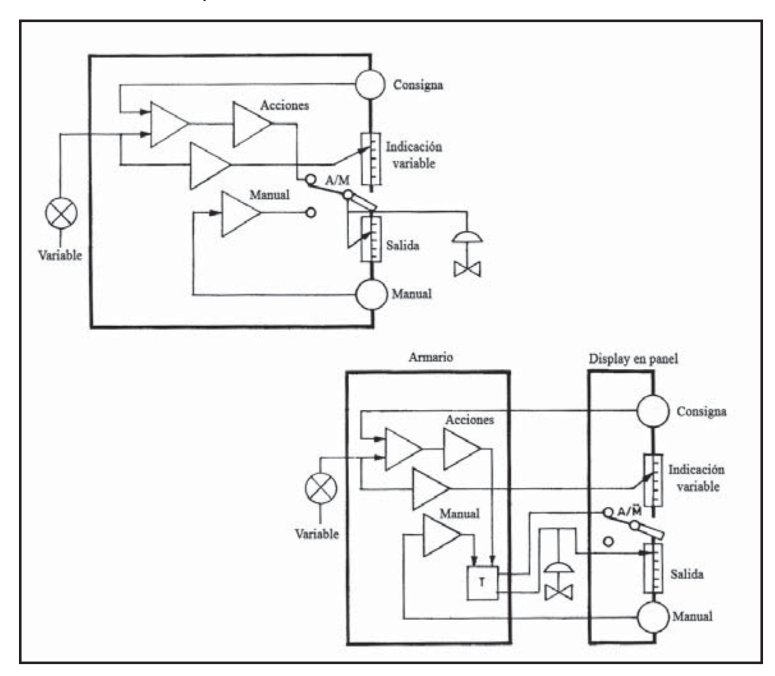


Figura B.7 Instrumentos miniatura integrales y de funciones separadas

B.4 Control distribuido

En 1975 aparece el denominado "control distribuido" (figura B.8) que cubre la necesidad de reducir el riesgo de averías, lograr una versatilidad que permita el cambio fácil del tipo de control y obtener la mayor economía posible en el control de la planta. En este tipo de control, uno o varios microprocesadores se encuentran repartidos en varios puntos de la planta, donde están conectados a varias señales de proceso correspondientes, en general, a una parte homogénea de la planta. Estos microprocesadores se distribuyen de forma arquitectónica y están conectados entre sí a través de una vía de comunicaciones, la cual comunica, a su vez, con el centro supervisor del control central, desde donde se tiene acceso de modo automático o manual a todas las variables de proceso de la planta.

La ventaja fundamental del control distribuido es la mayor seguridad y economía de funcionamiento, al ser los lazos de control de cada microprocesador de menor longitud (por estar situado en el centro óptimo de las variables de proceso captadas) y menos vulnerables al ruido o a los daños; por otro lado, ante la posible (pero poco probable) pérdida de la vía de comunicaciones (que suele ser redundante) los controladores continúan operando localmente. Además, el operador tiene acceso a todos los datos de los controladores (puntos de consigna, variables de proceso, señales de salida a válvulas, etc.) y puede visualizarlos a través de pantallas de televisión, ya que se halla en contacto con los mismos a través de la vía de comunicaciones.

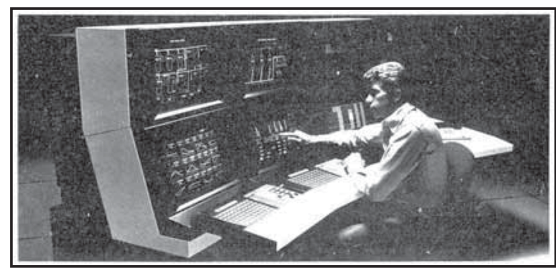




Figura B.8 Control distribuido: consola y estación universal (cortesía de Honeywell)

En el control distribuido, el proveedor suministra las consolas de control, de modo que ya no es necesario el proyecto y realización del panel de control. Conviene que el usuario indique los tipos de presentación visual que le interesen, prestando su ayuda en el diseño de las pantallas para la

representación del proceso, incluyendo la participación de los futuros operadores de la planta, para que ellos, aparte de verse envueltos y reconocido su papel en la planta, puedan influir en la construcción o fabricación de los diagramas, con los que después van a controlar el proceso.

La presentación visual o mímica en las consolas puede configurarse incorporando, a voluntad del usuario, las formas (tuberías, tanques, bombas, etc.) disponibles en la librería gráfica, situando colores diferentes y haciendo que el diagrama visualice los valores medidos en la pantalla y que el aspecto del proceso sea lo más real posible, por ejemplo, con tanques que se llenan o vacían, con tuberías que cambian de color según el valor de la temperatura, etc. La llamada a la información puede agilizarse por medio de un sistema de infrarrojos que detecta la posición del dedo del operador, al tocar éste la pantalla. De este modo, aparte de las entradas por teclado, el operador, aunque no tenga experiencia, puede pedir al sistema menús de ayuda, diagramas de flujo, presentación de alarmas, etc., sin tener que preocuparse por la sintaxis de las órdenes.

Si se desea, puede acoplarse un computador al conjunto del sistema para resolver problemas complejos de la dirección de la planta, desde los más sencillos como tendencias de variables y su interrelación, hasta los más complejos como la auditoria energética y la optimización de costos de las diversas secciones de la fábrica. La arquitectura distribuida de las funciones del computador permite analizar y comunicar entre sí los valores de variables, tales como el estado del inventario y análisis de los productos (tanto materias primas como productos terminados), la automatización de la producción y el mantenimiento y la información necesaria para la dirección para una toma correcta de decisiones sobre la marcha de la planta (optimización de la producción, mejora de la calidad y ahorro de energía).

El control distribuido ha evolucionado en los siguientes aspectos:

- Controladores multifunción para uso en procesos discontinuos en la modificación fácil y repetitiva de operaciones (*recipes*), incluyendo control lógico y secuencial, paros de emergencia, compensadores y diversos algoritmos de control.
- Sistemas de optimización de plantas coordinando múltiples controladores programables.
- Aplicaciones crecientes en el área de modernización de plantas.
- Microprocesadores cada vez más rápidos.
- Apoyo cada vez más perfeccionado al operador, a producción y a mantenimiento, en su integración en el manejo de la planta (consolas, control avanzado, módulos históricos, etc.).
- Perfeccionamiento en las vías de comunicaciones utilizando cables coaxiales y fibras ópticas, así como nuevos protocolos de comunicaciones.

Se emplean también controladores programables (PLC) que realizan fundamentalmente funciones de secuencia y enclavamiento de circuitos, sustituyendo así a los clásicos circuitos de enclavamiento a relés en los paneles de control y que, asimismo, como complemento, pueden realizar funciones de control *PID*.

Los controladores digitales universales basados en microprocesador sustituyen a los clásicos controladores miniatura de panel. Cada microprocesador contiene una unidad central, un reloj, memorias, módulos de entrada/salida, convertidores A/D, temporizadores y una fuente de alimentación. El microprocesador se comporta como un controlador *PID* con los algoritmos adecuados, acepta puntos de consigna remotos, tiene varios niveles de seguridad de protección de datos, acepta entradas universales (termopares, sondas de resistencia, mA, mV y voltios) y transmite la información necesaria del proceso con varias opciones de comunicaciones.

B.5 Control avanzado y transmisores inteligentes

En la búsqueda de la solución al control de procesos no lineales que el controlador clásico *PID* no resuelve satisfactoriamente, aparece a partir de 1970 el control adaptativo. Emplea un bloque controlador *PID* que incorpora un algoritmo de autoajuste de las acciones. Éste excita el proceso y la respuesta temporal obtenida es convertida a frecuencial gracias a una integral transformada de Fourier. La respuesta es analizada e introducidos los valores adecuados de las acciones *PID*, que son actualizados periódicamente. El instrumento es adecuado para los procesos de control difícil y cuyas características cambian con el tiempo y las condiciones de operación.

En 1983 aparece el transmisor digital inteligente con señal de salida analógica de 4-20 mA c.c. y se inicia el desarrollo de las comunicaciones (*fieldbus*) entre los instrumentos del lazo de control. Se eliminan las incómodas y caras calibraciones necesarias en los instrumentos convencionales, y se facilita el cambio del campo de medida y el autodiagnóstico. En 1986 aparece el primer transmisor enteramente digital, con lo que aumentan todavía más las prestaciones, con la única limitación importante en la normalización de las comunicaciones donde todavía no es posible el intercambio de instrumentos de diferentes marcas.

Otros métodos para controlar procesos no lineales aparecieron en el año 1970. Se basan en el conocimiento y en el aprendizaje y desarrollo de controladores especiales con señal de salida basada en la experiencia del proceso, más que en un modelo de controlador. Constituyen el llamado control inteligente del que forman parte los sistemas expertos, las redes neuronales y la lógica difusa. Poco a poco, han ido ganando aceptación, en especial los controladores neuronales predictivos, por su autoaprendizaje del proceso real, habiéndose realizado importantes avances en los últimos años.

El control predictivo aparece en la década de los años ochenta y el controlador trabaja como un inverso del modelo del proceso (modelo lineal) siendo capaz, por su robustez, de solucionar el control de la mayoría de los procesos no lineales.

B.6 Ergonomía

Cabe también señalar que se están aplicando técnicas de análisis, en la interfase hombre-máquina, en la seguridad y fiabilidad de operación de sistemas complejos. Estas técnicas se iniciaron en el campo de las centrales nucleares, en aviación y en sistemas informáticos. Estos estudios, cuyo objeto es analizar los incidentes y los accidentes ocurridos (por ejemplo, la catástrofe de Chernobil en Rusia) y poner los medios oportunos para que los errores humanos y técnicos que los han causado no vuelvan a presentarse, han iniciado sus aplicaciones en las plantas de proceso. Las técnicas que utilizan en general son:

- Cadenas de Markov, que definen un proceso aleatorio en un cierto número de estados finitos probables.
- Análisis de fallos en árbol (*fault-tree analysis*) que ante un suceso (fallo de un equipo o error humano) proporciona la secuencia cronológica de accidentes que pueden tener lugar.
- Simulación de Monte-Carlo, que permite la estimación del tiempo de fallo de un sistema a partir de las funciones de densidad de probabilidad de sus componentes individuales.
- Técnica Dylam, que modeliza los componentes del sistema, define los algoritmos de control, establece los sucesos de partida (por ejemplo, búsqueda de sucesos que puedan provocar temperaturas elevadas en el proceso) y genera y analiza los sucesos.

- Redes de Petri. Es un método gráfico que describe el flujo de actividades en sistemas complejos.
- Modificación de la fiabilidad humana (razonamiento ante incertidumbre, error humano ante tiempos límite de reacción y factores humanos).
- Fiabilidad del software.

Los resultados de estos análisis permiten minimizar los errores humanos en el diseño, la construcción y la operación de la planta. En este último caso, pueden diseñarse modelos hombre-máquina que permiten estudiar los diferentes comportamientos del operador ante situaciones difíciles, en las que tras reconocer la situación, gracias a la información presentada en las pantallas de la sala de control ayudado o no por sistemas expertos, actúa sobre el proceso y espera que su acción vuelva el proceso a la normalidad. Los fallos que pueda cometer el operador, uno de los cuales es el de "fijación", en el que ejecuta la acción errónea una y otra vez sin considerar la evidencia de las señales de alarma del proceso, dan lugar en gran parte de las plantas de proceso a un perjuicio económico (se pierden materias primas o en transformación) y, en partes determinadas de la planta, pueden representar un peligro de explosión o de liberación de gases o de materias peligrosas, por lo que estas consecuencias harán que dichas técnicas se apliquen con profusión para optimizar la interfase hombre-máquina (u hombre-sala de control) y prevenir dichos fallos humanos.

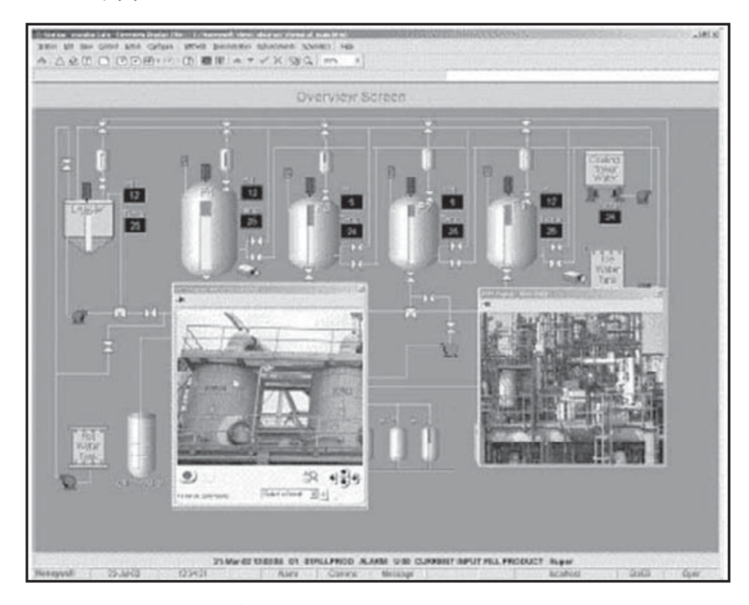


Figura B.9 *Visualización en vivo del proceso. Fuente: Experion de Honeywell*

La ergonomía también está presente en el panel de control, facilitando al operario una información exhaustiva del proceso en los puntos que le interesan. Puede controlar cámaras a distancia para ver en vivo imágenes de calidad del proceso. Puede ver como si fuera real, los niveles de tanques, cambios de temperatura en puntos del proceso, etc., (figura B.9).

B.7 Comunicaciones

Las comunicaciones han evolucionado desde las señales analógicas neumáticas (0,2-1 bar) que aparecieron en los años 40 a 47, las analógicas electrónicas (4-20 mA c.c.) en los años 50 a 60 y

las digitales en los años 83, siendo estas últimas capaces de manejar grandes volúmenes de datos, guardarlos en unidades históricas, y disponer de una precisión de más de 10 veces mayor que la señal clásica de 4-20 mA c.c. En lugar de enviar cada variable por un par de hilos (4-20 mA c.c.), transmiten secuencialmente las variables a través de un cable de comunicaciones llamado bus.

Las comunicaciones entre instrumentos se iniciaron con el puerto serie, pasaron después a sistemas híbridos, que utilizan el estándar analógico de comunicación 4-20 mA c.c., al que incorporan un protocolo de comunicación digital (*HART* es el más conocido) y que llenan el vacío existente entre las dos tecnologías analógica y digital. Estos sistemas se basaban en el estándar el OSI (*Open Systems Interconnections*) que permitió una normalización inicial de las comunicaciones, con la ventaja de obtener información de los datos del instrumento y cambiar la configuración de sus parámetros, integrando digitalmente los instrumentos con los sistemas de control. Los buses más importantes son el *Profibus* y el *Foundation Fieldbus*, que aparecieron hacia el año 1994.

Los fabricantes de sistemas de comunicaciones empezaron con sus propios sistemas llamados propietarios, es decir, sin que fuera posible intercambiar sus aparatos con los de otros fabricantes. Sin embargo, han llegado, por lógica, a fabricar instrumentos con protocolos abiertos, debido a la fuerte demanda del mercado. El fabricante dispone de instrumentos de bloques de funciones normalizados y asegura la interoperabilidad gracias a la definición de estos bloques de función estandarizados y a la tecnología de descripción de dispositivos. Lógicamente, el instrumento debe ser aprobado por el estándar del bus.

El año 2003 aparecen las redes de transmisores sin hilos que se utilizan para grandes distancias de transmisión o cuando el entorno es hostil, capaces de reducir la interceptación no autorizada, mediante el protocolo digital que usa el sistema FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), que modula las señal de datos con una portadora saltando de frecuencia en frecuencia en una banda ancha.

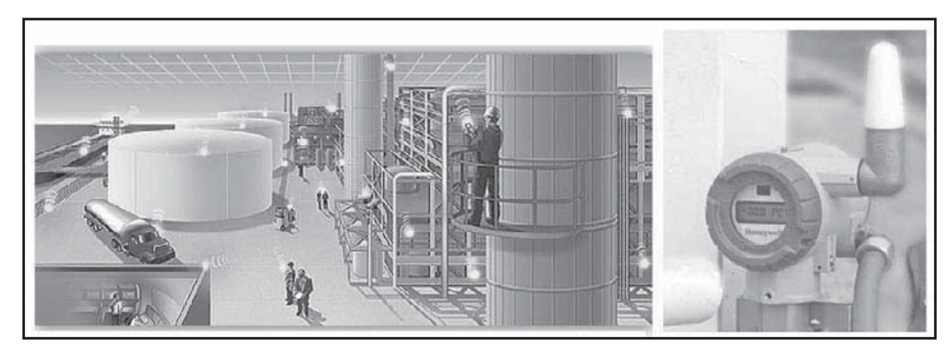


Figura B.10 Transmisión de señales de proceso vía radio. Fuente: Honeywell

El avance de los sistemas de comunicación ha repercutido favorablemente en la exactitud de las medidas, al compensar la variable medida con la influencia de otras ligadas al proceso (transmisor multivariable-medida de caudal con compensación de presión y temperatura) y al desarrollar el mantenimiento predictivo de los instrumentos, en particular, el de la válvula de control.

B.8 Futuro

Si bien es difícil predecir el futuro, en el horizonte del control se vislumbra que las tendencias se orientarán hacia:

- Siendo difícil que se adopte un único protocolo estándar de comunicaciones a nivel mundial, lo más probable es que los actuales queden reducidos a dos o tres, entre ellos *Foundation Fieldbus*, *Profibus*, etc. El mercado exige protocolos abiertos e interoperatibilidad entre instrumentos.

  Están apareciendo comunicaciones digitales sin hilos basadas en la telefonía móvil y en el PC. Entre ellas figura el estándar IEEE 802.11b (*Wi-Fi*) de alcance hasta 100 metros y el protocolo *Bluetooth* de corto alcance (10 a 100 metros), que usa radiofrecuencias del orden de 2,4 GHz. Ambos constituyen un entorno de información digital entre sensores y sistemas de señal.

  Gracias a la distribución de inteligencia que permiten los sistemas de comunicaciones, el usuario tiene libertad para ubicar el control en los sensores y en los actuadores. La visualización de las alarmas aparece en la pantalla. o en la impresora. en forma de páginas de listado. Por otro lado, los bloques de alarmas típicos de los paneles gráficos y semigráficos, que proporcionaban un pequeño número de datos críticos del proceso se transforman, incorporando un microprocesador y un monitor, con una disposición reticular de las alarmas que pueden comunicarse de modo inteligente con el sistema y que posibilitan la conexión con unidades remotas de 64 puntos o más cada una, y con la configuración que se desee en lugar de la sala de control, permitiendo así una mayor seguridad y flexibilidad del sistema.

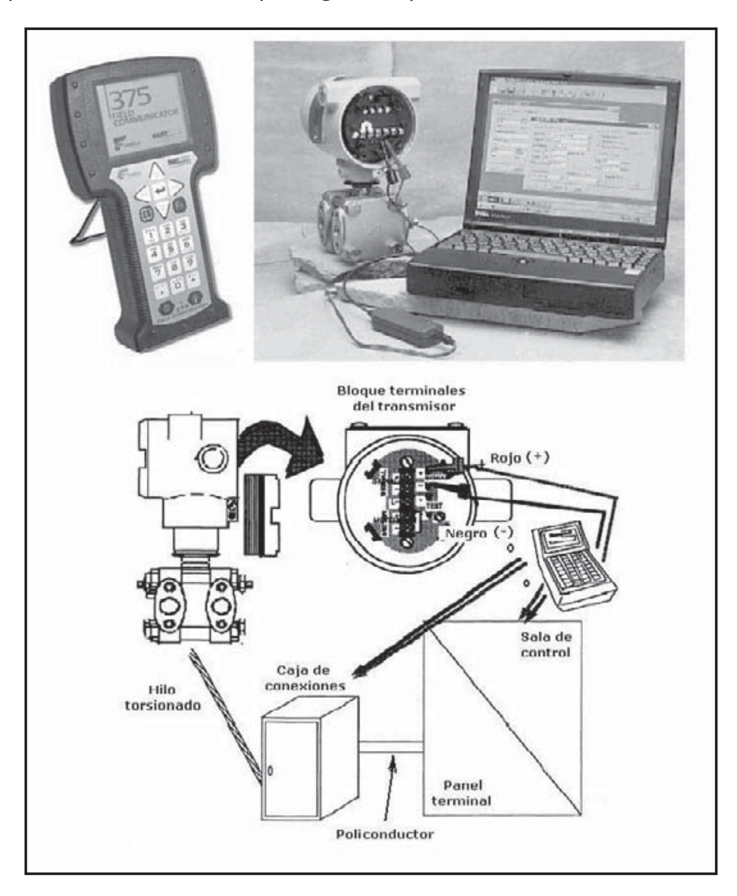


Figura B.11 Comunicador y configurador de campo. Fuente: Yokogawa y Honeywell

- Integración de los sistemas digitales, o sea integración de los protocolos de la información que facilite el acceso directo a la información que precisen de la planta, a los diferentes estamentos y personal de la empresa (planta, logística, dirección, producción, mantenimiento, etc.) que permita la calibración desde la sala de control, diagnósticos de fallo de los instrumentos, etc., con el objeto de mejorar la seguridad y aumentar el rendimiento de la planta. Es importante que la información esté unificada y sea utilizable para el uso de la gerencia, ya que ésta precisa acceder en tiempo real (o casi) a la información de interés con objeto de tomar mejores decisiones de negocios. Se vislumbra una mayor penetración de las soluciones de control basadas en PC por su compatibilidad, gran capacidad de procesamiento y bajo precio.
- Mejora de la interfase hombre-máquina para lograr, en lo posible, una planta segura libre de errores humanos. Los comunicadores portátiles permiten la consulta, cambio o configuración de las características de los instrumentos, en cualquier punto del proceso, conectando al transmisor, en el panel o en cualquier punto de la línea e, incluso, sin contacto con infrarrojos (figura B.11).

  Un ejemplo de esta tendencia es el diseño de una única ventana de inspección dedicada a aplicaciones críticas de procesos que sea independiente de otras informaciones que puedan superponerse y que distraigan o confundan al operador. Otro ejemplo lo constituye la reducción de las alarmas a las estrictamente indispensables para que el operador pueda atenderlas debidamente. Todo ello, requiere un buen uso de las herramientas gráficas disponibles en el control de procesos, por ejemplo la arquitectura OPC (*OLE for Process Control*) de interfase entre un controlador de bus de campo y las aplicaciones basadas en un PC.

  El uso de simuladores de proceso para entrenamiento periódico de los operarios se irá extendiendo, por el ahorro de tiempo en el entrenamiento, en particular, antes de la puesta en marcha y por la simulación de situaciones peligrosas que quizás no se presenten nunca al operador.

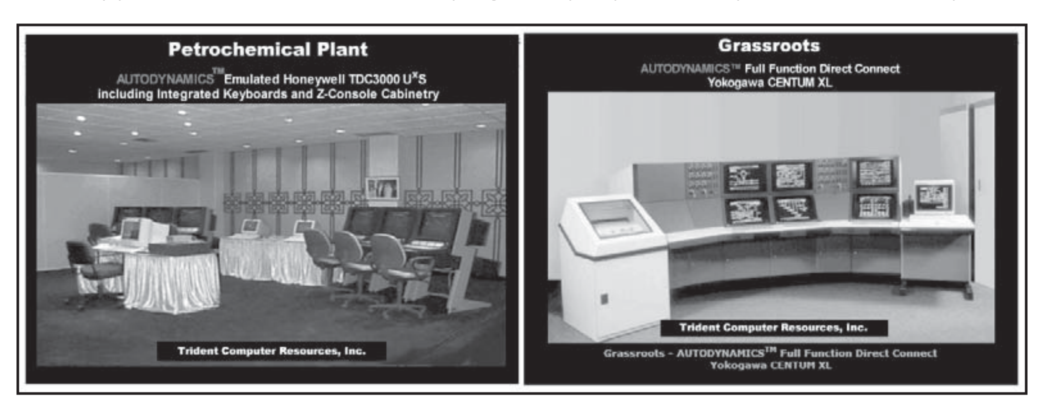


Figura B.12 *Simuladores de proceso para entrenamiento periódico de los operarios. Fuente: Trident Computer Resources*

- Mejora del mantenimiento estableciendo un mantenimiento preventivo que permita detectar la posibilidad de fallos antes de que se produzcan. Este tipo de mantenimiento está bastante desarrollado en las válvulas de control y en los transmisores inteligentes. Cabe señalar que la válvula neumática continúa liderando el mercado.
- Búsqueda de nuevos sensores que sean capaces de detectar cambios en variables en las cuales, hasta el momento, sólo es posible hacerlo inferencialmente, por ejemplo, la medición de la temperatura en los secaderos como forma indirecta de controlar la humedad.

Un nuevo sensor aplicado a materiales en grano (trigo, avena y soja) mide sus propiedades dieléctricas a la frecuencia de 9,46 gigahertz y a la temperatura de 24 °C, utiliza una función de calibración independiente del material y de su densidad y da la humedad, en tiempo real, con una precisión del 0,46% en base seca.

Esta función será la base para el desarrollo de un algoritmo de calibración universal para productos en grano.

Los biosensores, aplicables inicialmente a la industria alimenticia, proporcionan información sobre un proceso de la vida y consisten en pequeñas partículas luminiscentes (nanopartículas) que enclavan sus anticuerpos con el antígeno de las toxinas alimenticias extrañas (E. coli y salmonella) formando, así, grupos luminiscentes en el seno del producto.

La señal del nanosensor es rápidamente detectada y constituye una primera línea de defensa contra alimentos o agua contaminada.

Otra variedad de sensores químicos fluorescentes contiene una fuente luminosa que excita el elemento sensor que produce la fluorescencia y el fotodetector que capta la fluorescencia del sensor. El sistema puede detectar oxígeno, gases inorgánicos, compuestos orgánicos volátiles, componentes bioquímicos y organismos biológicos.

- Aumento de la calidad y de la exactitud de los instrumentos. Actualmente ya se llega en los transmisores a una estabilidad del 0,01% por año de vida y con un tiempo medio, entre fallos, del orden de los 470 años.

  En la figura B.14 puede verse la curva de evolución del conocimiento del control de procesos industriales. En cierta forma es inversa a la curva de aprendizaje (*learning curve*) (figura B.13) que representa la dificultad inicial de aprender algo y sacarle después provecho.

  De hecho, en la curva de evolución existirían las inversas de múltiples curvas de aprendizaje (una para cada innovación de la técnica de control).

  El efecto de aprendizaje es debido a la mejora de la productividad del trabajo que a medida que una tarea se repite, el tiempo necesario para llevarla a cabo tiende a disminuir, rebajando así su coste.

  El efecto aprendizaje depende del tiempo transcurrido y del volumen de fabricación, es decir, de la economía de escala (si las capacidades de producción y el volumen de ventas aumentan, los costes unitarios disminuyen).

  También se denomina *efecto de experiencia*, es decir, el coste unitario total de un producto decrece en un porcentaje constante cada vez que la producción de este producto se multiplica por dos.

  En el modelo de Wright's, la curva de aprendizaje se define por la función:

$$Y = a \times X^b$$

  en la que:

  Y = tiempo medio acumulativo de aprendizaje

  X = número acumulativo de unidades producidas

  a = tiempo requerido para fabricar la primera unidad

  b = pendiente de la función al representarla en una escala logarítmica

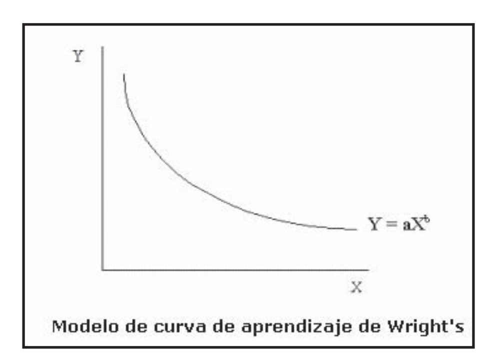


Figura B.13 Modelo de Wright de curva de aprendizaje

Figura B.14 Curva de evolución del conocimiento del control de procesos industriales

Glosario

Ábaco de Nichols. Equivale al diagrama de Nyquist tomando coordenadas cartesianas en lugar de coordenadas polares.

Alcance (*span*). Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.

Amplificador. Instrumento cuya señal de salida equivale a la señal de entrada incrementada y que se alimenta de una fuente distinta de la señal de entrada.

Amplificador magnético. Aparato que emplea transformadores saturables solos, o en combinación con otros elementos del circuito, con el objeto de lograr una amplificación o control.

Amplificador operacional. Amplificador de c.c. de alta ganancia que constituye la base de los controladores electrónicos.

Angstrom. Unidad de longitud empleada en espectroscopia aproximadamente igual a 10^{-10} metros.

Banda proporcional. Porcentaje de variación de la variable controlada necesario para provocar una carrera completa del elemento final de control. Es el recíproco de la ganancia.

Bias o polarización. Excitación aplicada a cualquier instrumento para determinar su punto de trabajo.

Bit. Unidad de información o dígito binario.

Calibración. Ajuste de la salida de un instrumento a valores deseados dentro de una tolerancia especificada para valores particulares de la señal de entrada.

Campo de medida (*range*). Espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento. Viene expresado estableciendo los dos valores extremos.

Campo de medida con elevación de cero. Campo de medida en que el valor cero de la variable o señal medida es mayor que el valor inferior del campo.

Campo de medida con supresión de cero. Campo de medida en que el valor cero de la variable o señal medida es menor que el valor inferior del campo.

Capacidad. Medida de la máxima cantidad de energía o de material que puede almacenarse dentro del recinto de un equipo.

Capacitancia. Variación en la capacidad contenida por unidad de variación de una variable de referencia.

Capacitancia de Radio Frecuencia (RF). Medida de nivel por emisión de radiofrecuencia que detecta la diferencia de tiempo entre la señal emitida del emisor y el eco recibido por la reflexión sobre el fluido. El tiempo empleado por estas señales de transmisión y retorno es proporcional al nivel. La medida depende de la constante dieléctrica del material por lo que es útil en la medida de nivel de materiales conductores y no conductores y de interfases.

Caudal crítico. Caudal en condiciones determinadas que se caracteriza porque la velocidad media del fluido es independiente de la presión aguas abajo.

Célula fotoeléctrica. Componente que varía de características cuando se expone a la luz.

Ciclo de Vida. Representa todas las fases del dispositivo, el diseño, la instalación, la operación, el mantenimiento y la comprobación

Compensación. Provisión de un aparato suplementario o de materiales especiales para contrarrestar fuentes conocidas de error.

Compresibilidad. Grado de disminución de volumen por unidad de volumen al aumentar la presión hidrostática.

Computador. Aparato que recibe información de entrada y que la procesa dando una información de salida según un programa preestablecido.

Computador digital. Computador en el que la información se representa en forma numérica.

Conductividad. Recíproco de la resistividad.

Consistencia. Propiedad que presenta un fluido de resistir los cambios permanentes de su forma al someterse a un esfuerzo de cortadura.

Control adaptativo. Controlador que ajusta automáticamente sus parámetros para compensar los cambios que puedan producirse en el proceso. Existe el controlador adaptativo de modelo de referencia y el controlador adaptativo autosintonizable.

Control anticipativo. Sistema de control en que se miden una o más variables de entrada al proceso que pueden perturbar la variable controlada y se toma una acción de corrección en la variable manipulada a través del elemento final de control. Este tipo de control puede combinarse con otros tipos de control, usualmente con el de realimentación, para reducir las desviaciones de la variable controlada.

Control avanzado. Técnicas que se apartan del control convencional PID y que se aplican en procesos muy complejos, no lineales, con retardos importantes y acoplamiento entre las variables. Se emplean, en general, para mejorar el rendimiento económico del proceso.

Control de gama partida. Sistema de control en que una variable manipulada tiene preferencia con relación a otra u otras del proceso. Se consigue, usualmente, haciendo que los elementos finales de control actúen cada uno para una parte de la gama de valores de salida del controlador.

Control de procesos discontinuos. Sistema de control en que se elimina automáticamente la acumulación de la acción integral que tiene lugar, en un controlador proporcional más integral, cuando la variable controlada cae por debajo del punto de consigna durante un tiempo suficiente.

Control de realimentación. Sistema de control en que se compara una variable medida con un valor deseado (punto de consigna) y la señal de error obtenida actúa de tal modo que reduce la magnitud de este error.

Control de relación. Sistema de control en que una variable de proceso es controlada en una razón dada con relación a otra variable.

Control derivativo. Forma de control en la que existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control.

Control digital directo (DDC). Sistema de control, que realiza un aparato digital, que establece directamente las señales que van a los elementos finales de control.

Control distribuido. Control digital realizado "distribuyendo" el riesgo del control único por ordenador en varios controladores o tarjetas de control de tipo universal con algoritmos de control seleccionables por software. Los transmisores electrónicos de campo, las tarjetas de control y la estación del operador están unidos mediante una vía de comunicaciones en forma de cable coaxial y cada componente se ubica en el lugar más idóneo de la planta.

Control en cascada. Sistema de control en que la señal de salida de un controlador (primario) es el punto de consigna de otro controlador (secundario).

Control estadístico del proceso (SPC). Monitoriza el comportamiento de las variables aleatorias que pueden conducir a problemas de control o a variaciones en la calidad de los productos fabricados aplicando técnicas estadísticas.

Control flotante. Forma de control en el que el elemento final se mueve a una velocidad única independiente de la desviación.

Control integral. Forma de control en que el elemento final se mueve de acuerdo con una función integral en el tiempo de la variable controlada.

Control integrado. Sistema de sistemas existentes, o que puedan añadirse a una planta, conectados mediante una red de datos y cuyo objetivo es conseguir una información del conjunto de todos los niveles de decisión de la planta y, al mismo tiempo, tener una individualidad en cada uno de los sistemas. El buen control automático de la planta permite obtener los datos y resultados necesarios para el control físico y la gestión de la producción.

Control multivariable. Tipo de control que compensa las perturbaciones en las variables del proceso y desacopla las mismas, de tal modo que si, por ejemplo, se cambia el punto de consigna de una de las variables sólo ésta queda afectada sin modificar o perturbar las restantes.

Control óptimo. Sistema de control que cumple la llamada ley de control, es decir, la señal de salida del controlador hace mínima la función objetivo de diseño y los resultados deben ser óptimos.

Control planificado. Adapta los parámetros del controlador en función del punto de operación en procesos no lineales.

Control linealizador global. Linealización global en el espacio abarcado por los estados del proceso para aplicar técnicas lineales a una planta pseudolineal.

Control por lógica difusa (*fuzzy*). La lógica difusa o borrosa es una forma de control que utiliza operadores para describir un sistema mediante reglas que utilizan términos como "el producto está un poco caliente", "algo frío", "muy caliente" o "justo lo caliente que deseamos".

Control por redes neuronales. Forma de control que imita el funcionamiento de las neuronas del sistema nervioso. La señal procedente de las diversas entradas o "dendritas" genera excitación en la salida o "axón" de la neurona, siempre que se sobrepase un determinado umbral. Cada conexión neuronal (sinapsis) se caracteriza por un valor llamado peso que puede ser excitador (positivo) o inhibidor (negativo) del elemento del proceso.

Control predictivo. Basado en el uso de modelos dinámicos del proceso establecidos de tal forma que permiten anticiparse y predecir las situaciones futuras del proceso con el objeto de utilizar esta información para modificar la estrategia actual de control.

Control proporcional. Forma de control en la que existe una relación lineal entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control.

Control proporcional de tiempo variable. Forma de control en la que existe una relación predeterminada entre el valor de la variable controlada y la posición media en tiempo del elemento final de control de dos posiciones. La relación entre el tiempo de conexión y el de desconexión es proporcional al valor de la variable controlada.

Control robusto. Tolerancia o insensibilidad del controlador ante los cambios o perturbaciones que puedan presentarse en las condiciones de trabajo del proceso

Control selectivo. Sistema de control en que se selecciona automáticamente uno de varios controladores según el valor de sus variables de entrada, generalmente con el objeto de evitar daños en el proceso o en el producto.

Control supervisor. Sistema de control en el cual los bucles de control operan independientemente sujetos a acciones de corrección intermitente a través de sus puntos de consigna.

Control todo-nada. Forma de control en que el elemento final de control adopta dos posiciones fijas.

Controlador. Instrumento que compara la variable controlada con un valor deseado y ejerce automáticamente una acción de corrección de acuerdo con la desviación.

Controlador de acción directa. Controlador en el que la señal de salida aumenta (o disminuye) al aumentar (o disminuir) la señal de entrada.

Controlador de acción inversa. Controlador en el que la señal de salida disminuye (o aumenta) al aumentar (o disminuir) la señal de entrada.

Controlador programable. Instrumento basado en microordenador que realiza funciones de secuencia y enclavamiento de circuitos y, como complemento, funciones de control PID.

Controlador universal. Basado en microprocesador sustituye al controlador convencional miniatura de panel. Realiza funciones de control PID, dispone de niveles de seguridad de protección de datos, acepta entradas universales (termopares, sondas de resistencia, mA, mV y voltios) y tiene varias opciones de comunicaciones.

Convertidor. Instrumento que recibe una señal estándar y la envía modificada en forma de señal de salida estándar.

Correctores. Aparatos que eliminan el retardo del proceso. Entre ellos se encuentran el corrector de Smith y el corrector de modelo de referencia.

Corriente parásita. Corriente inducida en el cuerpo de una masa conductora por variación del flujo magnético.

Cuerpo negro. Cuerpo que absorbe toda la energía radiante que recibe. Experimentalmente es un recinto cerrado provisto de una pequeña abertura.

Decibelio. Unidad sin dimensiones que expresa el cociente de dos valores de potencia. Equivale a diez veces el logaritmo en base 10 del cociente de potencias, con la potencia de referencia seleccionada arbitrariamente en 10^{-16} vatios/cm^2.

Deriva. Variación de la señal de salida que se presenta en un período de tiempo determinado mientras se mantienen constantes la variable medida y todas las condiciones ambientales. Viene expresada en tanto por ciento del alcance.

Diafragma. Elemento sensible formado por una membrana colocada entre dos volúmenes. La membrana es deformada por la presión diferencial que le es aplicada.

Diagrama de Bode. Es la representación de la función de transferencia tomando como abscisas la frecuencia en base logarítmica y en ordenadas la ganancia expresada en 20 log (relación de amplitudes) y el desfase expresado en grados.

Diagrama de Nyquist. Representación de la función de transferencia en coordenadas polares en que cada punto de la curva define un módulo y un argumento a una frecuencia determinada.

Display. Presentación visual de una señal.

Elemento final de control. Recibe la señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control. La válvula de control es el elemento final típico.

El**emento primario.** Convierte la energía de la variable medida en una forma adecuada para la medida.

Elevación de cero. Cantidad con que el valor cero de la variable supera el valor inferior del campo.

Emisividad. Relación entre el grado de variación de energía radiante de una parte opaca pulida de un cuerpo y el correspondiente a la misma área de un cuerpo negro, ambos a la misma temperatura.

Energía radiante. Energía formada por ondas electromagnéticas.

Ensayo dinámico. Ensayo realizado para acumular información correspondiente al comportamiento total y respuesta frecuencial del instrumento.

Error. Diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida.

Error de angularidad. Desviación de los puntos de la curva de los valores de salida del instrumento con relación a la recta que relaciona la variable de entrada con la salida de un instrumento ideal sin error y coincidiendo los dos en los puntos 0% y 100% del campo de medida.

Error de cero. Desplazamiento constante de todos los valores de salida del instrumento con relación a la recta que relaciona la variable de entrada con la salida de un instrumento ideal sin error.

Error de multiplicación. Aumento o disminución progresiva de todos los valores de salida del instrumento con relación a la recta que relaciona la variable de entrada con la salida de un instrumento ideal sin error.

Estabilidad. Capacidad de un instrumento para mantener su comportamiento durante su vida útil y de almacenamiento especificadas.

Exactitud (*accuracy*). Cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida.

Fiabilidad. Medida de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de límites especificados de error a lo largo de un tiempo determinado y bajo condiciones especificadas.

Fluido o agente de control. Es el proceso, energía o material correspondiente a la variable manipulada.

Fotón. Cuanto de radiación electromagnética.

Foundation Fielbus (FF). Organización sin ánimo de lucro formada por los casi 120 proveedores y usuarios más importantes de automatización y control de procesos. Protocolo de bus de datos digi-

tal, serie y multipunto entre dispositivos de campo y/o sistemas de un entorno industrial, diseñado para obtener más información sobre el proceso y sobre el propio instrumento, y establecer reglas de rendimiento, seguridad y detección de errores.

Frecuencia. Número de ciclos por unidad de tiempo. Es el recíproco del período.

Función de transferencia. Relación matemática, gráfica o tabular entre las expresiones función del tiempo de las señales de salida y de entrada a un sistema o elemento. Equivale también al cociente de las transformadas de Laplace de las funciones de respuesta y de excitación.

Galga extensométrica. Convierte la variable medida en una variación de resistencia debida a la deformación en dos o en los cuatro brazos de un puente de Wheatstone.

Galvanómetro. Instrumento que mide una pequeña corriente eléctrica a partir de fuerzas electromagnéticas o electrodinámicas que se traducen en un movimiento mecánico.

Ganancia. Es la relación de magnitudes entre la señal de salida resultante y la señal de entrada de excitación.

HART (*Highway Addressable Remote Transducer*). Protocolo de comunicaciones híbrido que modula en frecuencia una señal de ±0,5 mA de amplitud superpuesta a la señal analógica de salida del transmisor de 4-20 mA c.c. Codifica en forma senoidal los estados lógicos 1 y 0 con las frecuencias de 1.200 Hz para el 1 y 2.200 Hz para el 0. Como la señal promedio de una onda senoidal es cero, no se añade ningún componente de c.c. a la señal analógica de 4-20 mA c.c.

Histéresis. Diferencia máxima en los valores de salida del instrumento para el mismo valor cualquiera del campo de medida cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos ascendente y descendente. Viene expresada en tanto por ciento del alcance.

IEC 61508 (o 61511 específica para procesos industriales). Norma que define los niveles de riesgo de las aplicaciones y los requisitos que deben cumplir los sistemas de control adecuados a cada nivel.

Impulso. Variación finita de una cantidad cuyo valor es normalmente constante.

Incertidumbre de la medida (*uncertainty*). Resultado de una operación de calibración en la que se compara el instrumento a calibrar con un aparato patrón para averiguar si el error se encuentra dentro de los límites dados por el fabricante del instrumento. Como el aparato patrón no permite medir exactamente el valor verdadero (también tiene un error) y, como además en la operación de comparación intervienen diversas fuentes de error, no es posible caracterizar la medida por un único valor, lo que da lugar a la llamada incertidumbre de la medida o incertidumbre (*uncertainty*).

Infrarrojo. Zona del espectro electromagnético comprendida entre 0,78 a 300 micras.

ISO 9000:2000. Norma actualizada de la ISO 9000 del año 1984 que cambia la exigencia de procedimientos documentados por la de procesos adecuados, siendo uno de sus objetivos principales el aumento de la satisfacción del cliente. Consta de las normas de calidad: ISO 9000 - Fundamentos. ISO 9001 - Requisitos. ISO 9004 - Sistemas de dirección. ISO 19011 - Auditorias de gestión.

Interoperabilidad. Posibilidad de interconectar y operar dispositivos de varios fabricantes en la misma red sin pérdida de funcionalidad, es decir, se puede sustituir un equipo de un fabricante por otro pudiendo utilizar de inmediato las prestaciones extras que nos dé este segundo dispositivo.

Lazo abierto de control. Es el camino que sigue la señal sin realimentación.

Lazo cerrado de control. Camino que sigue la señal desde el controlador hacia la válvula, al proceso y realimentándose a través del transmisor hacia un punto de suma con el punto de consigna.

Masa. Cantidad de materia medida por su inercia.

Medidor másico de nivel (HTG = *Hydrostatic Tank Gauging*). Mide directamente el contenido másico de un tanque mediante presión hidrostática con dos transmisores de presión de muy alta precisión, estabilidad y repetibilidad, separados entre sí por una distancia fija y una sonda de temperatura.

Memoria. Aparato en el que puede introducirse información y extraerse más adelante.

Micra. Unidad de longitud igual a 10^{-6} metros.

Multiplexado. Transmisión simultánea de dos o más señales a través de un canal único. Los dos métodos básicos de multiplexado implican la separación de señales por división del tiempo o de la frecuencia.

Octava. Intervalo entre dos frecuencias con la relación 2 a 1.

Offset. Desviación permanente que existe en el control proporcional cuando el punto de consigna está fijo.

OPC. Significa OLE (*Object Linking and Embeding* - enlace e incrustación de objetos) para Control de Procesos (*Process Control*) y es un estándar abierto para compartir datos entre dispositivos de campo y aplicaciones de ordenador.

OSI (*Open Systems Interconnections*). Protocolo de comunicaciones, propuesto por ISO (Organización Internacional de Normalización) y formado por varios niveles. Uno de ellos, el de usuario, normaliza las funciones básicas de todos los instrumentos de tal manera que aparatos de distintos fabricantes son intercambiables.

Piezoelectricidad. Propiedad que tienen algunos cristales naturales o artificiales de presentar un momento de dipolo eléctrico cuando se les deforma. Este efecto es reversible.

Pirómetro de infrarrojos. Capta la radiación espectral del infrarrojo, invisible al ojo humano, y puede medir temperaturas menores de 700 °C, abarcando desde valores inferiores a 0 °C hasta más de 2.000 °C.

Potenciómetro. Divisor de tensión ajustable formado por un reóstato de tres terminales, uno de ellos móvil. Instrumento que mide una fuerza electromotriz desconocida mediante su compensación contra una diferencia de potencial conocida producida en un circuito por corrientes conocidas.

Precisión. Cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras, es decir, es el grado de dispersión de las mismas.

Proceso o sistema controlado. Engloba las funciones realizadas por el equipo en el cual es controlada la variable, sin incluir los instrumentos de control.

Proceso continuo. Proceso en el cual entran componentes y salen productos en caudales sin restringir y durante largos períodos de tiempo.

Proceso discontinuo. Proceso que se lleva a cabo con una cantidad dada de material dentro de un reactor sin que se cargue material adicional durante la operación.

PROFIBUS. Red de comunicaciones abierta, muy popular en Europa, estándar e independiente de fabricantes (interoperable). Dispone de tres perfiles de usuario: *PROFIBUS FMS*, *PROFIBUS DP* y

PROFIBUS PA (automatización de procesos incluso en áreas con riesgo de explosión, comunicación con equipos de campo).

Programador. Instrumento que ajusta su propio punto de consigna o bien el punto de consigna de otro instrumento controlador de acuerdo con un programa prefijado.

Puente. Término empleado para designar la configuración eléctrica general de ciertos elementos transductores. Es también una abreviación de puente de Wheatstone.

Punto de consigna. Variable de entrada en el controlador que fija el valor deseado de la variable controlada. Puede fijarse manual o automáticamente, o bien programarse.

Radar de microondas. Medidor de nivel basado en la emisión continua de una onda electromagnética que no es influida por la temperatura ni por las variaciones de densidad que puedan existir sobre el líquido. La onda es continua y está modulada en alta frecuencia (por encima de los 10 GHz), de modo que se detecta la diferencia de frecuencia entre la señal emitida y el eco recibido. Esta diferencia de frecuencias es proporcional al tiempo empleado por estas señales de transmisión y retorno, es decir, al nivel.

Radiación. Emisión y propagación de energía en forma de ondas a través del espacio o a través de un material.

Radiactividad. Fenómeno de transformación espontánea de un núcleo.

Rangeabilidad (*rangeability*). Gama de caudales regulables que la válvula es capaz de regular dentro de la exactitud de la característica inherente de al válvula.

Rayos gamma. Cuanto de radiación electromagnética emitida por un núcleo como resultado de la transición entre dos niveles de energía.

Realimentación. Parte de la señal de salida de un sistema que vuelve a la entrada.

Receptor. Recibe la señal procedente del transmisor y la indica o registra.

Relación de desviación. Curvas de respuesta del proceso que en ordenadas tienen como valor la razón entre la amplitud de la desviación en lazo cerrado (con control) y la misma en lazo abierto (sin control) y en abscisas la frecuencia en escala logarítmica. Permiten determinar la bondad del controlador en la eliminación de las perturbaciones según la frecuencia.

Repetibilidad. Capacidad de reproducción de los valores de salida del instrumento al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación recorriendo todo el campo. Viene expresada en tanto por ciento del alcance.

Resistividad. Resistencia de un material expresada en ohmios por unidad de longitud y de sección.

Resolución. Magnitud de los cambios en escalón de la señal de salida al ir variando continuamente la medida en todo el campo. Viene expresada en tanto por ciento de la salida de toda la escala. Grado en que pueden discriminarse valores aproximadamente iguales de una cantidad.

Resolución infinita. Capacidad de proporcionar una señal de salida progresiva y continua en todo el campo de trabajo del instrumento.

Respuesta ante una entrada en rampa. Respuesta de un sistema al excitarlo con una rampa unidad.

Respuesta dinámica. Igual a respuesta frecuencial.

Respuesta frecuencial. Variación con la frecuencia de la relación de amplitudes señal de salida/variable medida (y de la diferencia de fases entre la salida y la variable medida) para una medida de variación senoidal aplicada a un instrumento dentro de un campo establecido de frecuencias de la variable medida.

Respuesta impulsional. Respuesta de un sistema al excitarlo con un impulso unidad.

Respuesta indicial. Respuesta de un sistema al excitarlo con un escalón unidad.

Robustez. Tolerancia o insensibilidad del controlador ante los cambios o perturbaciones que puedan presentarse en el proceso.

Ruido. Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseadas que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados.

Seguridad aumentada. Sistema de seguridad que adopta medidas para impedir la existencia de cualquier tipo de arco o chispa que pueda provocar la ignición de la mezcla explosiva.

Seguridad intrínseca. Sistema de seguridad para atmósferas peligrosas que limita la capacidad de un circuito para producir chispas eléctricas que tengan la suficiente energía para provocar la ignición de la mezcla explosiva. Se usan las barreras Zener y las barreras galvánicas.

Sensibilidad. Razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona después de haberse alcanzado el estado de reposo. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.

Señal. Salida o información que emana de un instrumento. Información representativa de un valor cuantificado.

Señal de salida. Señal producida por un instrumento que es función de la variable medida.

Señal de salida analógica. Señal de salida del instrumento que es una función continua de la variable medida.

Señal de salida digital. Señal de salida del instrumento que representa la magnitud de la variable medida en forma de una serie de cantidades discretas codificadas en un sistema de notación. Se distingue de la señal de salida analógica.

SIL (*Safety Integrity Level*). Especifica el Nivel de Integridad de la Seguridad que define, en función del posible impacto de un fallo sobre personas y bienes y su probabilidad, el nivel de seguridad requerido del sistema y, por tanto, de todos sus componentes.

Sistema experto. Contiene una base de conocimientos extraída de expertos, de tal forma que detecta y diagnostica los problemas potenciales que pueden presentarse en el control de procesos de una planta industrial, pudiendo tomar decisiones inteligentes y justificar su mecanismo de razonamiento de una forma inteligible.

Sistemas de seguridad. Diseñados para que el tiempo de tolerancia a fallo del proceso o tiempo de seguridad del proceso (PST = *Process Safety Time*) no sea superado, cuando un fallo ocurre en el proceso o en el sistema de seguridad,

Supresión de cero. Cantidad con que el valor inferior del campo supera el valor cero de la variable.

Tacómetro. Instrumento que mide la velocidad de rotación de un eje.

Tarjeta H1. Componente del estándar Foundation Fieldbus que interconecta los fieldbuses de transmisores, válvulas e instrumentos de campo a la velocidad de 31,25 KBits/s.

Tarjeta H2. Componente del estándar Foundation Fieldbus que hace accesibles las tarjeta H1 a la red Ethernet de alta velocidad (HSE = *High Speed Ethernet*) de 1 MBits/s a 2,5 Mbit/s.

Temperatura ambiente. Temperatura que prevalece en un ambiente dado.

Temperatura de almacenamiento. Temperatura o intervalo de temperaturas en las que puede almacenarse el instrumento.

Temperatura de servicio. Campo de temperaturas en el cual se espera trabaje el instrumento dentro de límites de error especificados.

Termistor. Resistencia cuyo valor varía con la temperatura en una forma definida deseada.

Termopar. Par de conductores de materiales distintos unidos entre sí que generan una fuerza electromotriz cuando las dos uniones están a distintas temperaturas.

Termopila. Grupo de termopares conectados en serie y utilizados para medir la potencia de radiaciones.

Termorresistencia. Hilo de material cuya resistencia varía con la temperatura, generalmente en forma lineal.

Tiempo de acción derivada. Equivale al tiempo en minutos con que la acción derivada se anticipa al efecto de la acción proporcional en el elemento final de control.

Tiempo de acción integral. Equivale a minutos por repetici6n de la acción proporcional. También se acostumbra a expresar en el recíproco, repeticiones por minuto.

Tiempo muerto. Retraso definido entre dos acontecimientos relacionados entre sí.

Tolerancia al fallo. Tiempo máximo disponible para que un sistema de seguridad actúe eliminando los fallos encontrados en el proceso sin afectar su funcionamiento.

Transductor. Recibe una señal de entrada función de una o más cantidades físicas y la convierte modificada o no a una señal de salida.

Transmisor. Capta la variable de proceso a través del elemento primario y la convierte a una señal de transmisión estándar.

Transmisor inteligente. Transmisor que tiene incorporadas funciones adicionales tales como compensación de no linealidades del sensor, calibración innecesaria al tener grabados 126 puntos o más, cambio fácil del campo de medida mediante un intercomunicador.

Transmisor multivariable. Dispone de varios sensores que permiten aplicar criterios varios de compensación de variables.

Transmitancia. Ver Función de Transferencia.

Tubo Bourdon. Tubo manométrico curvado de metal elástico que se deforma al aplicar presión en su interior.

Tubo Pitot. Tubo cilíndrico, con un extremo abierto dirigido contra el fluido aguas arriba, que mide la presión de impacto.

Ultravioleta. Radiación electromagnética de ondas comprendidas entre 136 a 4000 angstroms.

Unidad aritmética. Parte de un computador que realiza operaciones aritméticas.

Unión de medida. La unión de medida de un termopar es la unión que está a la temperatura que desea medirse.

Unión de referencia. La unión de referencia de un termopar es la unión que está a la temperatura conocida o de referencia.

Variable controlada. Dentro del bucle de control es la variable que se capta a través del transmisor y que origina una señal de realimentación.

Variable manipulada. Cantidad o condición del proceso variada por el elemento o elementos finales de control.

Variable medida. Cantidad, propiedad o condición física que es medible.

Vida útil de servicio. Tiempo mínimo especificado durante el cual se aplican las características de servicio continuo o intermitente del instrumento sin que se presenten cambios en su comportamiento más allá de tolerancias especificadas.

Viscosidad. Resistencia a la deformación de un fluido bajo un esfuerzo de cortadura.

Zona muerta (*dead band*). Campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.



Bibliografía

General

ISA - *Standards Numerical Index,* 2006.

Norma ISA-S 5.2-1976 *Binary Logic Diagrams for Process Operations*.

Norma ISA-20-1981 *Specification Forms for Process Measurement and Control Instruments, Primary Elements, and Control Valves*.

Norma ISA-S5.3-1983 *Graphic Symbols for Distributed. Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems.*

Norma ISA-S 5.1-1984 (R 1992) *Instrumentation Symbols and Identification*.

Norma ISA-S5.5-1985 *Graphic Symbols for Process Displays*.

Norma ISA-S5.4-1991 I*nstrument Loop Diagrams*.

ANSI/ISA-50.00.01-1975 (R2002) *Compatibility of Analog Signals for Electronic Industrial Process Instruments*.

ISA100.11a *wireless industrial automation network at ISA Expo 2008*.

DIN 19227 *Parte 1 de códigos de identificación de instrumentos y controles*.

DIN 19227 *Parte 2 de símbolos gráficos*.

ISO 3511 *Industrial process measurement control functions and instrumentation - Symbolic representation*, partes 1 (año 77), 2 (año 84), 3 (año 84) y 4 (año 85).

ISO 14617 *Graphical symbols for diagrams,* 2002.

Normes AENOR E 04 202 de junio 76 (*Dessins techniques - Symboles graphiques de genie chimique*).

Smart Instrumentation, Cecil L. Smith, Chemical Engineering, mayo 1985.

Simulación y control de procesos por prdenador, Antonio Creus, Marcombo, S. A., 1987.

Measurement Systems, Application and Design, Ernest O. Doebelin, McGraw.-Hill Publishing Company, 1990.

Manual de instrumentación para la industria del gas, Sedigas, 1994.

Fiabilidad y seguridad de procesos industriales, 2ª edición, Marcombo S.A., 2005.

Intrumentos industriales - Su ajuste y calibración, 3ª edición, Marcombo S.A., 2009.

Process/Industrial Instruments and Controls Handbook. Douglas M. Considine. McGraw-Hill. October 1999.

Instrument Engineer's Handbook, Béla G. Liptak, Chilton Book Company, 2003.

Handbook of Applied Instrumentation, Douglas M. Considine, McGraw-Hill Book Company, 1964.

Instrumentation in the Processing Industries, Béla G. Liptak, Chilton Book Company, 1973.

Revistas INTECH de la ISA (*The Instrumentation, Systems and Automation Society*).

Conferencias y artículos de ISA. Sección Española (Sociedad Internacional de Medición y Control).

Instrumentación: mercado, estado del arte y tendencia, revista Oilgas, marzo 2002.

Catálogos de Fischer-Rosemount.

Catálogo general de OMRON.

Catálogos de Honeywell.

Catálogos de ABB Automation Group.

Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones, CEA-ENAC-LC/02 Rev. 1.

Guía para la expresión de la incertidumbre en los ensayos cuantitativos, G-ENAC-09 Rev 1 Julio 2005.

Metodología para el cálculo de incertidumbre, J. Ángel Moreno.Centro Nacional de Metrología, Laboratorio de Impedancia Junio 2005, México.

Transmisores

Fieldbus: How a worldwide standard will benefit the HPI, P.L. Early, Jr., & J. Miller, Hydrocarbon Processing, Diciembre 1993, Vol 72, nº 12.

When control instruments "talk", performance improves, Robert A. Wenstrup, Allen, Bradley Co., Chemical Engineering, diciembre 1994.

Boost plant performance through upgraded instrumentation, Mark Boland, Fisher Rosemount Systems Inc., Chemical Engineering, septiembre 1995.

Fieldbus wiring design and installation Guide, Relcom Inc - 2002.

Fieldbus function Blocks, Instruction Manual, Smart 2002.

Fieldbus Tutorial - A Foundation Fieldbus Technology Overview, Foundation Fieldbus 2002

Fieldbus Glossary, Fondation Fielbus, 2002.

ISA "*Fieldbuses for Process Control - Engineering, Operation and Maintenance*", Jonas Berge.

ANSI/ISA-50.02 *Fieldbus Standard for Use in Industrial Control Systems*.

Honeywell XYR 5000™ Wireless Transmitters.

ST 3000 Smart Transmitter Honeywell.

Catálogos *Optoelectrónica y Fibras Ópticas*, Honeywell.

Wireless Making the right connections. Chemical Engineering Noviembre 2007.

About HART. Analog Services Inc 2001.

Presión

Pressure Measurement by C. F. Cusick, Honeywell Instrumentation Magazine, Honeywell.

Instrumentos de medición de presión y temperatura en la industria química, Wika 2006.

Caudal

Brooks Technical Bulletin 6311-T-001: *Guide to Brooksmeter application*.

Brooks Application Bulletin AB-12: *The Application of Magnetic Flowmeters to waste-water treatment processes*.

Brooks Specification: *Electromagnetic Flowmeter*, DSE 7100-71200-71300.

Manual del Ingeniero Químico, John H. Perry.

Principles and Practice of FIow Meter Engineering, L. K. Spink, The Foxboro Company.

Flow Meter Engineering Handbook, C. F. Cusick, Honeywell: Automation-lndustrial Division.

Boletín Krohne: *Calculation methods for variable area meters*.

Shell Flow-Meter Engineering Handbook, 2nd Edition 1985. G. W. A. Danen, McGraw-Hill Book Company.

Consider Vortex Shedding flowmeters, K. Wilbeck, Fischer Controls, Hydrocarbon Processing, agosto 1988.

Manual de medición de grandes caudales de SEDIGAS, 1991.

Solving material metering problems, Craig J. Nissen, Intech, abril 1992.

Medición de caudales en procesos industriales, J. Meyer, Endress + Hauser S.A., Automática e Instrumentación, nº 258, noviembre 1995.

Selecting the right flowmeter, James Pomroy, Fisher Rosemount, Chemical Engineering, mayo 1996.

Annubar Primary Element Flow Calculations, Rosemount.

Norma Internacional ISO-5167-1980 *Mesure de debit des fluides au moren de diaphragmes, tuyeres et tubes de Venturi insértés dans de conduites en charge de section circulaire*.

ISO 5167-4:2003 *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits*.

Flow Measurement, Bela G. Liptak.

Nonintrusive installation, increasing accuracy, and low maintenance have helped to swell the ranks of ultrasonic flowmeters against more traditional methods. David Clayton, Automation Research Corp., Control Engineering, 9/1/1998.

Orifice Flowmetering - Pressure/Temperature Compensation, AD353-124 Rev 1, November 2005, Siemens.

Segmental Wedge Meter, Progressive Measurements Inc.

Determination of the Flow Rate of Different Fluids by a Rotameter 2005, Bogdan Stoyanov, Jordan Beyazov. Institute of Metal Science, Sofia.

Variable Area Technology, Brooks Instrument.

Turbine Flowmeters for Liquid Measurement, SPONSLER CO.,INC. 2002.

Turbine Flowmeters - Part 1: Details of the Basic Axial Turbine Flowmeter, Oct 1, 1999, David Wadlow.

Nivel

Foxboro Technical Information I-A-81a: Measuring level with capacitance.

Nivotester, Gammapilot, silometer, nivopilot, catálogos de Endress & Hauser. *A guide to safe level control*, Roto-Bin-Dicator.

Industrial Applications of Radar Technology for Continuous Level Measurement, W. L. Hendrick, Instrument Society of America, 1992.

Look at your process non-invasively, Walt Boyes and Randall Jean, Chemical Engineering, junio 1994.

Complete Flow and Level Measurement Handbook and Encyclopedia, OMEGA Press, 1995.

Measuring level: A guide for CPI users, Sarah Parker, Fisher Rosemount, Chemical Engineering, mayo 1995.

Aplicación de transmisores por microondas, Oliver Reher, Endress + Hauser España, Automática e Instrumentación, nº 262, marzo 1996.

RF Level Measurement Handbook, Princo Instruments, Inc., 1999.

Advanced Electronics Overcome Measurement Barriers Control, February 1999 (covering the capacitance method of measuring level).

DR3000 Gauging Radar Transmitter, Ametek Drexelbrook, 2001.

Liquid level indication, Vaihinger Niveau Technik, 2001.

Hydrostatic Tank Gauging System, Reference Manual, Emerson.

Level measurement, Guided microwave, VEGA.

Rosemount 5600 Series Radar Level Transmitter.

High-Resolution Magnetostrictive Level Transmitters, Babbit International.

Intelligent transmitters for liquid level measurement, Foxboro.

The Simple Bubble Tube, December 23, 2007, Jim Allen's Website.

Transactions in Measurement & Control Volume 4, FLOW & LEVEL Measurement, Omega.

Protección contra la irradiación externa, Manuel R. Ortega.

Advancements in radar level, by Chris Lamakul Revista Intech julio 2003.

Capacitance level measurement, Omega.

Level Measurement Trends in the Solids Industry, Tim Little, Product Manager, Radar.

ST 3000 Smart Transmitter, Series 900 Flange Mounted Liquid Level Models Honeywell, 2/08.

Interface Measurement Technology: Pressure, Emerson.

Level sensing of liquids and solids - a review of the technologies, James A. Hunt, Hove, UK, 2007.

Tuning into wireless - Wireless Technology, Tank Storage, Brian Warshaw, Noviembre 2008.

Temperatura

Installation and use of Chromel-alumel thermocouples, Hoskins Manufacturing Company, catálogo A. P.

Temperature measurement and sensor selection, T. J. Claggett y R. W Worrall, volumen 20, núm. 4, Instrumentation Magazine Honeywell.

Land Radiation Pyrometers, boletín L.R.P. 67.

Especificación S939-2a: Radiamatic Temperature Detector and Accesories.

Thermocouples and resistance thermometers, catálogo Honeywell.

Infrared sensors for glass temperature measurements, C. W. Briggs, Instrumentation Magazine, Honeywell.

Norma Internacional IEC-584-1982 e IEC-751-1983 sobre termopares y sondas de resistencia.

Process Instrumentation Dantech, Catálogo general.

Tests on intelligent temperature transmitter type STT25H, Honeywell SA, France.

Failure Modes, Effects and Diagnostic Analysis - STT250 temperature transmitter, Honeywell International Inc., USA.

Thermocouple Colour Codes, Peak Sensors.

Ratio (two color) pyrometer, FAR Associates - 2002

NIST's Thermocouple Tables and Coefficients, G.R.Peacock 1997.

Steinhart-Hart Equation, Cornerstone Sensors.

National Semiconductor's Temperature Sensor Handbook, National Semiconductor.

Practical Thermocouple Temperature Measurements, Dataforth Corporation.

Temperature Measurement, Béla G. Lipták.

Otras variables

Weighscales are going electronic, David Vagi, Chemical Engineering, septiembre 1988.

Measuring and Controlling humidity, Robert W. Worrall, Instrumentation, volumen 17, núms. 1 y 2.

Industrial pH instruments, catálogo de The Bristol Company.

Catálogo 30-r: Process electrolytic conductivity equipment, Beckman.

Boletín PIB-4: Measurement and control of pH and Conductivity, Honeywell.

Foxboro Technical Information 1-90a: *Fundamentals of pH Measurement*.

Beckman process pH and ORP analyzers, boletín 4074.

Dynatrol-density-specific gravity control, Automation Products Inc.

Beckman: Continuous Infrarred Analyzers, boletín IR-4055-C.

Furnace atmospheres and their control, R. l. Gruber, Honeywell.

Boletín 7050.32.4480.11: *Oxygen Monitor PW 9600*, Philips.

Boletín Krohne: R*adio-active density and thickness measurement*.

Boletín Krohne: *Specific gravity meters*.

Select the right pH Measurement System, Howard E. Hesketh, Chemical Engineering Progress, octubre 1995.

Nuclear radiation sees it aU, Raul Brenner, Chemical Engineering, agosto 1994.

Catálogos de Básculas de Mettler, Toledo.

Nucleonic density measurements, ABLE Instruments & Controls Limited

9782 pH/ORP analizador controlador multifunction Honeywell.

4114 Dew Point Transmiter Honeywell.

Analyze IT - Single and Dual Input Analyzers for High Level Conductivity, ABB.

Turbidity Sensing As A Building Block For Smart Appliances by Tim Erickson MICRO SWITCH, Honeywell Inc.

*Instrumentation Measurement and Analysi*s, B C Nakra, K K Chaudhry.

Gamma Based Consistency Measurement in the Pulp and Paper Industry, Consistency Pro 2001.

La medida de pH, Crisson.

Infrared Análisis, Yokogawa.

The Guardian Hydraulic Load Cells, Cardinal.

True Accuracy of Humidity Measurement, Dieter R. Wiederhold, Wiederhold Associates.

Insertion Liquid Density Transducer, Solartron, Mobrey.

Smart Sensors and Analytical Instruments, Honeywell 2006.

Elementos finales de control

GBV-18: Pneumatic Valve Positioner HP, especificación Honeywell.

GBV-16, GBV-17, GBV-15: Series 800 Control Valves, especificación de Honeywell.

Cat. núm. YH 112: Cage valves, Yamatake Honeywell.

Valve Construction and Engineering Guide, PIB-14, Honeywell.

Masoneilan Control Valve Sizing Handbook.

Realistic control-valve pressure drops, J. R. Connell, Northem Alberta Institute of Technology, Chemical Engineering, septiembre 1987.

Why valves are always oversized, H. W. Boger y LucienMazot, Masoneilan, Intech Vol. 40, nº 10, octubre 1993.

Rethink the Role of Control Valves, Barry White, Valtek StarSystems, Chemical Engineering Progress, diciembre 1993.

Compare Metal and Non Metal Valves, Tim Robinson, Asahi/America, Chemical Engineering Progress, diciembre 1993.

Keep control valves in working order, Dana Bresler y J ames R. Rodda, Chemical Engineering, febrero 1994.

Keep Valve Top works from becoming a bottom priority, Bill Fitzgerald, Fisher Controls, Chemical Engineering, diciembre 1995.

Verimax Serie 30000, Especificación CN 3000(S), 03/94 Masoneilan-Dresser.

Control Valve Primer - A User's Guide, 2ª edición, Hans D. Baumann, Instrument Society of America, 1994.

Control Valves for the Chemical Process Industries, BillFitzgerald, McGraw-Hill lnc., 1995.

Varipak Serie 28000, Especificación CH 4500E, 02/96 Masoneilan-Dresser. Masoneilan Smart Valve Interface.

Online Control Valve Diagnostics, Chosei Kaseda et al., Yamatake Corporation, 2000.

ANSI/ISA-75.01-2002 (IEC 60534-2-1 Mod) *Flow Equations for Sizing Control Valves*.

ISA-75.07-1997 *Laboratory Measurement of Aerodynamic Noise Generated by Control Valves*.

FIELDVUE Digital Valve Controllers, Fisher-Rosemount.

Fieldbus Valve Positioner, Dresser, Masoneilan.

Industrial Actuator Motors Honeywell.

Valtek Severe Service Equipment, USA.

Fugitive emissions and control valves, Emerson 2006.

Control valve technology, Steve Hagen, Emerson.

Control Valves, Spirax Sarco.

New technology makes electric control-valve actuation a viable alternative, Chris Warnett.

Guidelines for Selecting the Proper Valve Characteristic, Michael C. Headley, 2003, Valve Manufacturers Association.

Engineering Information, Solenoid Valves, Asco, Febrero 2009.

Control Valve Actuator Options, CCI.

Herculine Electric Actuator Solutions, Honeywell.

Flowserve Cavitation Control, Flowserve.

Cavitation in Control Valves, Samson.

41000 Series Control Valves, Masoneilan.

Classification of seat leakages through control valves, Engineering Toolbox.

Controladores

Principles of Automatic Process Control, 1968, Instrument Society of America.

Catálogos e Información *Experion Process Knowledge System* (PKS), Honeywell.

TDC 3000X Galvanic Isolation/Intrinsic Safety Field Termination Assemblies Specification and Technical Data, GA03-100, R500-6/96.

Incorporating statistical Process Control within a Distributed Control System, C. L. Mamzick, T. W. Tucker, Control Engineering, julio 1988.

SCADA Systems Merging with Distributed Control, George J. Blickley, Control En-. gineering, febrero 1988.

Getting a perspective on Distributed Control, Control & Instrumentation, mayo 1987.

Control de procesos industriales - Criterios de Implantación, Antonio Creus, Colección Prodúctica, Marcombo, S. A., 1988.

Tuning of PID Controls of Different Structures, A. Kaya y T. J. Scheib Control Engineering, julio 1988.

Control de procesos no lineales: aplicación al caso de pH, Ignacio Serra, César de la Prada y Pastora Vega, Automática e Instrumentación nº 206, octubre 1990.

A practical guide to Neural Nets, Marylin McCord Nelson, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1991.

Las redes neuronales en el control de procesos. El controlador neuronal predictivo, José Manuel Nistal Bartolomé, enero 1991.

Advances in intelligent control, C. J. Harris, Taylor & Francis 1994.

Manual, feedforward, feedback control provide process control, Paul Murrill, Intech Tutorial, Junio 1998

ISA-12-1999 *Electrical Apparatus for use in Class I, Zone 0 and 1 Hazardous (Classified) Locations General Requirements*.

ABB catálogo de instrumentos industriales.

ISA Handbook of Measurement Equation - Tuning process controllers starts in manual.

Preventing explosions in hazardous locations, Joe Kaulfersch, Intech, March 2004.

Applying Intrinsic Safety, Scientific Technologies Inc., February 2009.

Optimize Your Plant Using the Latest Distributed Control System Technology, Ralph Porfirio, Revista Power.

Intelligent Control System, Flowserve.

Device Management Tool DSV401 SMART VISION - Your tool for Intelligent Assets, ABB.

U.S. Chemical safety and hazard investigation board - Investigation report, Report nº 2005-04, Refinery explosion and fire, Texas regulatory oversight, march 2005.

Honeywell Industrial Wireless Solutions.

What Is PID - Tutorial Overview, Plant Triage, ExperTune.

Open Loop Tuning Rules, Apco Inc.

NAMUR Recommendation, Version 24.08.2004, NE 105, *Specifications for Integrating Fieldbus Devices in Engineering Tools for Field Devices*.

IEC 61804-3, Edition 1.0 (2006-09), *Function blocks (FB) for process control - Part 3: Electronic Device Description Language (EDDL)*.

Implementación digital de controladores PID, Ignacio Peñarrocha, enero de 2006.

Introducción a las Técnicas de Computación Inteligente, José Aguilar y Francklin Rivas, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2001.

Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (2002), RD 842/2002.

Plant Scape - Control integrado, Honeywell, 2002.

SCT 3000 Smartline Configuration Toolkit, Honeywell, 2002.

Smart System 302 para control integrado, Smar, 2002.

Control multivariable, revista Control Engineering, 2002.

Optimize process regulation, Phillip D.Schnelle, Jr., Kenneth D. Jackson and Julie F. Smith, Dupont Co., 2002.

Doris Sáez. *Apuntes I: Control predictivo basado en modelos*, Marzo, 2002, U. Quilmas.

DC1000 Series General Purpose Universal digital controllers, Honeywell.

Duplex Time Proportional Control, Honeywell, 2000.

Intelligent Tuner, Fisher-Rosemount-Emerson, 2002.

What is MVC - Model predictive-adaptive control technology, Siemens 2003.

IEC 61511 Safety Instrumented Systems Overview & Current Status, Simon Brown Control & Instrumentation Systems, 13/ 11/ 2002.

Honeywell's New Experion LS Brings the Power of a Distributed Control System to Smaller Manufacturing Sites, ControlGlobal.com, 02/03/2009.

Seguridad Intrínseca, TEXCA 1999.

HVAC - Honeywell Engineering Manual of Automatic Control for Commercial Buildings, John Gerry.

Plant Security: The New Process Variable, Jon Harmon, Global Director of Critical Infrastructure Protection for Honeywell Process Solution, Chemical Engineering, May 2008.

Plants Smarten up, C. Kenna Amos, contributing editor, junio 2006.

Calibración de los instrumentos

Procesos de calibración P-002 para Manómetros tipo Bourdon, Ovredal, Noviembre 1992.

Norma ISO 9002/UNE 66-902/EN 29002.

ISO 9000 putting the quality process to work, John Forrest, ABS Consulting Services, Chemical Engineering, septiembre 1995.

Standards for the measurement of pressure, P. R. Stuart, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, Measurement and Control, vol. 20, octubre 1987.

Series 6000 Digital Pressure Gage, Ruska, especificación RUS 6000 8.91-5000-1991.

Catálogos Beamex de calibradores de presión, temperatura y software de calibración, 1999.

Series 6000 Digital Pressure Gage, especificación RUS 60008-91-5000 RUSKA.

Norma ISO 9000:2000.

How often should instruments be calibrated?, Beamex, Noviembre 2007.

MCS 100 Modular Calibration Systems, Beamex.

Aplicaciones en la industria

1D41-00-43: Blast Furnace, Honeywell lnstrumentation Data.

38-00-03: Forehearth temperature controls for the glass industry especification, Honeywell.

Instrumentation for evaporator control, R. D. Irwin, W. S. Sharshon, M. Lafferty, boletín técnico CH-M-4a, 1965, Honeywell.

Simple multiloop control systems, D. M. Wills. Instrumentation, vol. 15, núm. 3, Honeywell Magazine.

DO9(70)-DS-10A: Draught Measurement in Boiler Instrumentation, Honeywell.

DO9(70)-DS-10B: Flue Gas AnaIysis in Boiler Instrumentation, Honeywell.

Basic Boiler Control Systems, W. O. Weber, Honeywell.

Application Data Sheet on Process Boilers, Honeywell.

Boletín AB-5: Instrumentation for your Cement Plant, Honeywell.

Industrial Steam System Process Control Schemes, Steam System Information, 2003.

Boiler Control Systems, Unified Facilities Criteria (UFC), 2001.

Análisis dinámico de los instrumentos

l. G. Ziegler y N. B. Nichols, *Optimum Settings for automatic controllers*, vol. 65, págs. 443-444 (1943).

ISA-S26-1968: Dynamic response testing of Process Control Instrumentation, Standard of Instrument Society of America, revisada octubre 1968.

A Simplified Technique of Control System Engineering, G. K. Tucker y D. M. Wills, Honeywell Inc., 1962.

Simulación y control de procesos por ordenador, Antonio Creus, Marcombo S.A., 1987

Adaptive Control, Karl Johan Astrom, Bjorn Wittenmark, Lund Institute of Technology, Addison Wesley Publishing Company, 1989.

Software para control robusto, Benedicto Calle, Automática e Instrumentación, abril 1990.

Control avanzado - Seminario Regulación Automática de Procesos - IPA, José Mª Nistal Bartolomé, marzo 1992.